机器人DIY系列



双足步行机器人DIY

〔日〕坂本范行 著
崔素莲 译



机器人DIY系列

双足步行机器人DIY

〔日〕 坂本范行 著
崔素莲 译

科学出版社
北京

图字：01-2010-1271号

内容简介

本书是“机器人DIY系列”之一，介绍了如何用价格低廉的齿轮箱和电机来制作双足步行机器人，并在有限的条件下使其逐渐成长、功能更加完善。按照机器人的成长过程，本书分为6章：脚擦地步行，直线前进，直线前进、直线后退，直线前进、后退和转弯，用微机自动控制，制作接近于人的双足步行机器人。此外，“实验·理解”栏中的简单实验有助于理解双足步行机器人的重心、支撑区、静步行、动步行等基本理论知识。

本书可供机器人爱好者阅读，也可用作工科院校相关专业师生的教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

双足步行机器人DIY/(日)坂本范行著；崔素莲译.—北京：科学出版社，2010
(机器人DIY系列)
ISBN 978-7-03-028774-8
Ⅰ.双…　Ⅱ.①坂…②崔…　Ⅲ.机器人-研究　Ⅳ.TP242
中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第165507号

责任编辑：喻永光　杨　凯／责任制作：董立颖　魏　谨
责任印制：赵德静／封面设计：郝恩誉

北京东方科龙图文有限公司　制作
http://www.okbook.com.cn

科学出版社　出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
北京天时彩色印刷有限公司　印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2010年9月第 一 版　开本：B5（720×1000）
2010年9月第一次印刷　印张：11 1/2
印数：1—4 000　字数：215 000

定价：28.00元
（如有印装质量问题，我社负责调换）

前言

要了解双足步行机器人的步行原理，最好的办法是做一个这样的机器人并让它动一动。但双足步行机器人集材料、构造、原动力、传感器、控制、步行原理和现代技术之大成，对从零开始的初学者来说要越过很多障碍。从这点来看，联杆结构的机器人可以把很多步行机能委托给联杆结构，对于初学者来说更实际。

本书的目的不是制作参加比赛的机器人，而是以制作结构简单的双足步行机器人来理解双足步行的理论基础。因此，动作优美的切比雪夫联杆结构和平行杠杆组合而成的脚，可以用价格低廉的齿轮箱和电机来制作，并作为本书的基本硬件。对初次制作者来说，如果能做到加工正确，即使是一张塑料板，通过变形也可成为双足步行机器人，从而能体会到步行的乐趣。另外，为了使初学者能根据自身情况进行双足步行的实验，本书采取了在每个阶段都让机器人成长的形式。最后，虽然采用了微机控制，但传感器和电机末端的前置放大器是自制的，这正是目前作为双足步行机器人标准的伺服电机原理。由于脚的动作依靠联杆，所以用自制的伺服电机也可进行控制，对于想了解按程序步行的双足步行机器人的人来说，一定要试一试。

在每章的“实验·理解”栏里，虽然都是些简单的实验，但同时也与双足步行机器人密切相关。特别是第2章的重心实验和第6章的动步行实验，请一定要“实验·理解”一下。

另外，在制作中特别要注意安全。当尺寸对不上时，即使多次重做，也不要因心急而碰伤。

当看着自己辛辛苦苦制作出的机器人时，一定会充满爱意、不由自主地想起个名字吧？用这样的机器人一边进行着各种实验，一边思考着步行的结构原理，从此便踏入了双足步行机器人的世界里。

最后，对在本书执笔之际给予大力协作的ohmsha的各位，在此深表谢意。

坂本范行

如何阅读本书

本书以在第1章中制作的双足步行机器人为基础，然后按照后续每章使机器人成长的。因此，可以在每章中停下来休息片刻，在欣赏机器人步行实验的同时，也可以学习双足步行的基本原理。

第1章

参考人的双足步行，分析步行的原理，制作双足步行的机器人。把抬脚，向前迈步这样的动作，通过1个电机和联杆结构实现。虽说是简单的机器人，但可以在实验中看到机器人边左右转动身体边双足行走的样子。

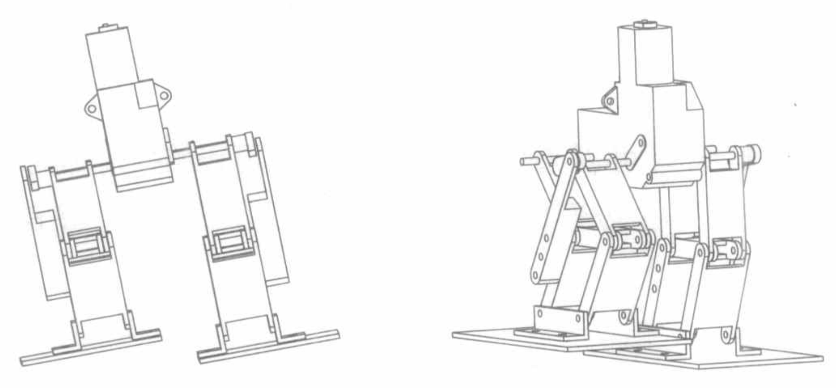


图1 在第1章中制作的双足步行机器人边左右转动身体边双足行走

在第1章中制作的脚，可一直用到第5章，故以后每章不必从脚开始制作。

第2章

增加重心移动的结构。力求简单，不增加电机，而是想办法在联杆结构上使重心移动。实现了能抬脚，向前迈步的步行基本功能，并切实感受到了改善后的直线前进。

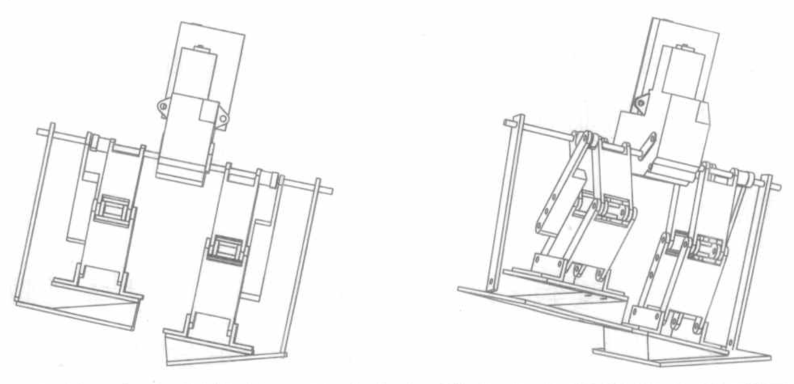


图2 在第2章中制作的双足步行机器人在直线前进上得到了改善

第3章

为了使重心移动，增加了一个电机，也可进行遥控了。重心移动采用了使上身倾斜的方法，在实验中可以看到把重心放到一只脚上的各种样子。

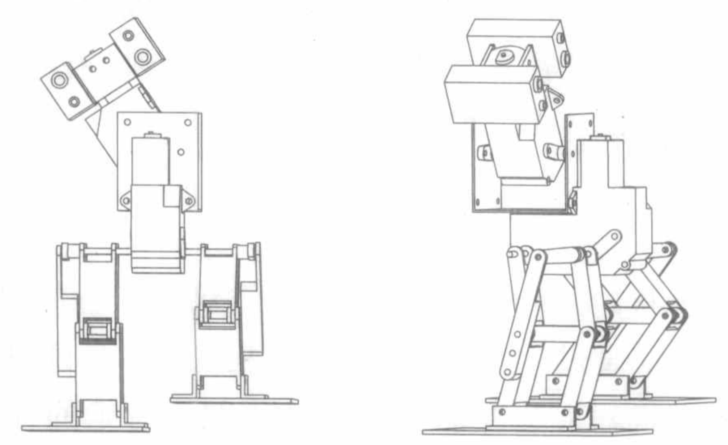


图3　在第3章中制作的双足步行机器人的重心移动可以进行遥控

第4章

从第3章的实验结果可以看出，机器人似乎可以转弯。所以，一边进行前进和后退，一边进行左右转弯的实验，使机器人成长为能够前进、后退和转弯的双足步行机器人。

第5章

搭载微机。在制作上，有电子零件的焊接和程序调试等等，难度稍微高一些，但机器人成长为能按程序行走的双足步行机器人了。

电机和旋转传感器的组装也力求在制作上简单化，所以其原理比较容易理解。

第6章

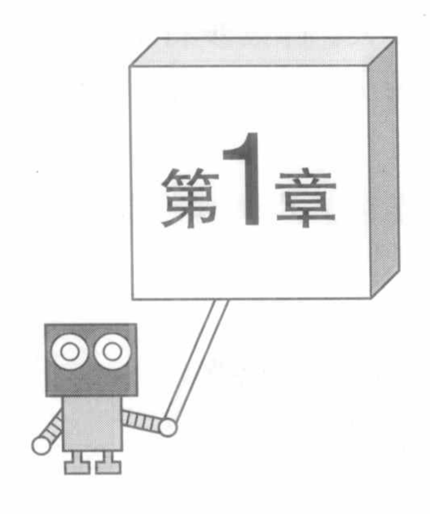
对本田ASIMO那样高难度的双足步行机器人及市场上销售的昂贵双足步行机器人所采用的稍高水平双足步行理论的基础部分进行了简要说明，对于想挑战各种机器人的制作者来说可以参考。

试验·理解

每章根据需要设有“试验·理解”，虽然尽是些用厚纸做人形的简单实验，但如果要学习双足步行机器人理论的话，一定会有重心、支撑区、静步行和动步行这样的基本知识，通过这样的实验可以对这些知识加以理解。

目 录

第6章　制作接近于人的双足步行机器人



脚擦地步行

——电机1个——

在第1章，将要制作双足擦地步行的机器人。我们边分析人步行时的动画摄影，边思考双足步行机器人的结构。考虑到要使初学者也能制作出易控制、花费低、制作过程简单的双足步行机器人，所以在制作时减少了电机的数量，采用了联杆结构。在第1章中制作的脚，以后各章都要继续使用。每章都会让机器人成长，最终成为能直进、后退和转弯的双足步行机器人。

在第1章制作的脚，将是以后各章的基础，所以请务必正确地制作。

1.1 人的步行分析

在地球上，能用双足自由活动的生物是什么？对，是人。无论其他任何动物还是高性能的双足步行机器人，其步行都远远不及人。持续步行数百万年的人类是双足步行者的老前辈。在制作双足步行机器人之前，先让我们观察一下人的步行情况。

图1.1是把人步行时的姿势摄影后又剪辑而成的连续静止画像。为了便于理解，把步行时的动作稍微夸大了一些。

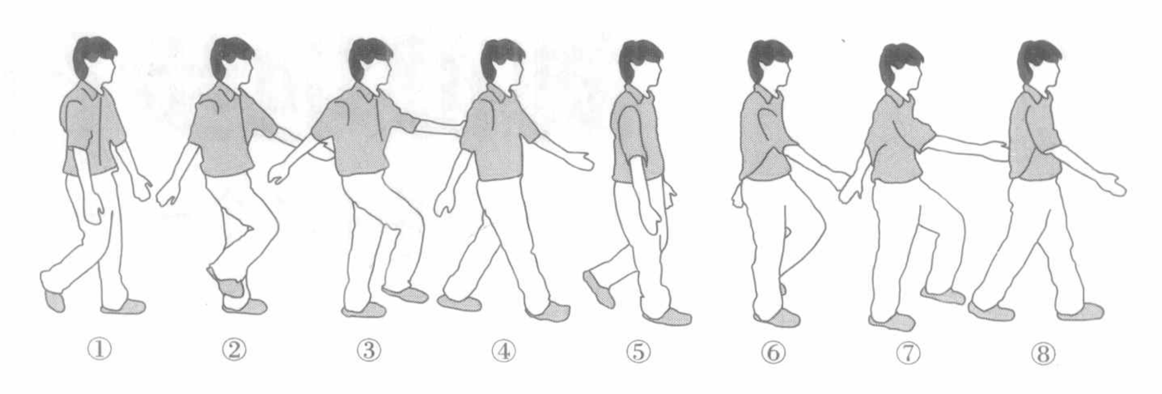


图1.1 从人的步行摄影中，捕捉的画像

仔细看一看图1.1，分析人的双足步行情况：

分析1 步行是右脚向前迈出后，左脚再向前迈出的重复进行。（①～⑧）

分析2 右脚向前迈出时，上提右脚。（②、③）
左脚向前迈出时，上提左脚。（⑥、⑦）

分析3 右脚向前迈出时，只用左脚支撑身体。（②、③）
左脚向前迈出时，只用右脚支撑身体。（⑥、⑦）

分析4 右脚迈向前方的同时，左脚留在后方。（③、④）
左脚迈向前方的同时，右脚留在后方。（⑦、⑧）

大家是如何分析的呢？我想一定能列举出很多的分析结果，比如膝盖的弯曲方法、胳臂的摆动方法、后足的蹭地方法等等。如果有时间，也可以对快走和跑步进行动画摄影，自己进行分析一定更有意思。

1.2 脚的结构

1.2.1 切比雪夫联杆结构

让我们以前节中对人的步行分析为基础考虑一下脚的结构吧。

为了让机器人实现人的步行姿势，在足部的可动部位可考虑用电机来替换。这样，膝盖上、腰上等部位也要放上电机，需要的电机数量很多，如图1.2所示；所需的费用相应也大，并且对各个电机的控制也变得复杂起来，这对初学者来说，需要越过的门槛也增多了。

为此，要理解步行原理就应尽量减少电机的数量，制作简单、费用低的双足步行机器人。

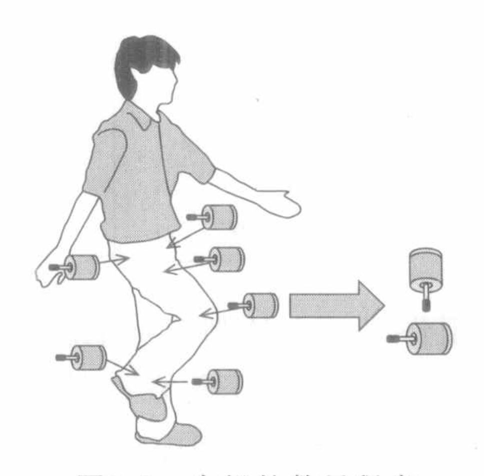


图1.2 电机的数量很多

为了能在减少电机数量的情况下实现步行动作，这里采用联杆结构。

联杆结构应用于各种产品中，比如掘土机。其中有一种名叫切比雪夫的联杆结构。也许你没有听到过此名，但在《机器人竞赛杂志》No.57 (ohmsha发行)《用LEGO MINDSTORMS制作(技术上篇)》中便使用了由切比雪夫联杠结构和平行杠杆组合后的结构，我想一定有不少人看到过吧？在双足步行机器人格斗竞技大会ROBO-ONE第一次大会上获胜的机器人“TA-17”的脚，也使用了这种结构。

这种结构如图1.3所示。深色部分为切比雪夫联杆结构，浅色部分是平行杠杆结构。因各杆都是联杆，所以又称为“节”。切比雪夫联杆结构是由原动节、静止节、中间节、延长中间节及从动节组成，原动节的转动可使中间节、延长中间节、从动节进行规定的动作。如果把原动节的长度比作1，其他

各节的长度则见表1.1。

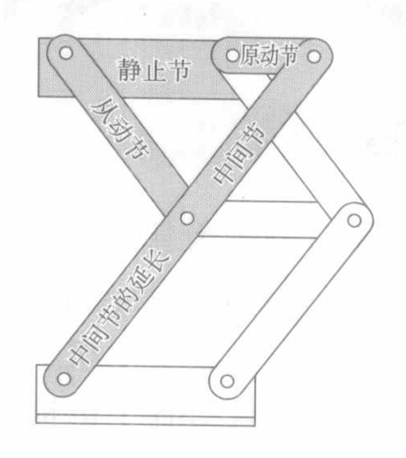


图1.3 切比雪夫联杆结构

表1.1 切比雪夫联杆结构各节的长度比

原动节	1
静止节	2
从动节	2.5
中间节	2.5
延长中间节	2.5

如果把图1.3的结构用作机器人的脚，则切比雪夫联杆结构（深色部分）负责把脚抬起并向前迈出的动作，而平行杠杆结构（白色部分）则使脚面与地面保持平行。这种结构的动作情况可用图1.4来表示。

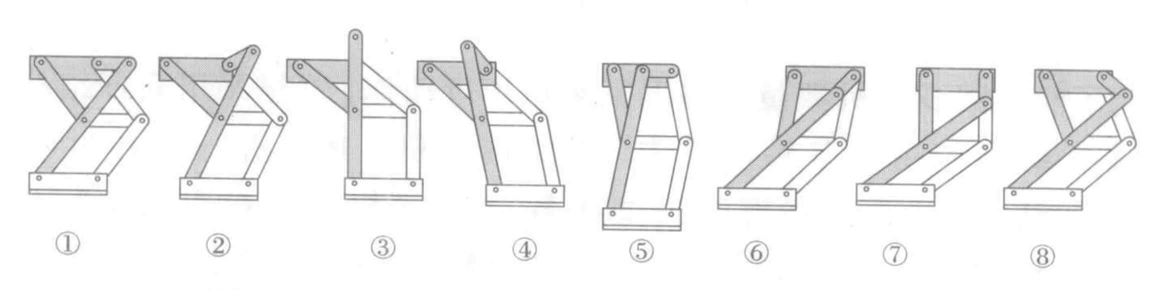


图1.4 切比雪夫联杆结构与平行杠杆结构组合的动作

和图1.3比一比便明白，由于原动节的转动，使中间节、延长中间节、从动节按规定的动作运作。再者，想必大家一定注意到了，平行杠杆部分使和延长中间节相连接的脚面与地面保持平行。与图1.1中右脚的动作对应起来看一看。

图1.4的①～④是脚向前迈出的动作，⑤是脚着地的动作，⑥～⑧则是脚落在后边时的样子。

在本书中制作的双足步行机器人的脚将采用切比雪夫联杆结构，在双脚上配置切比雪夫联杆结构后的形象如图1.5所示。使原动节转动，其他节（杠杆）就可按规定的动作运作，做出图1.4那样的步行动作。

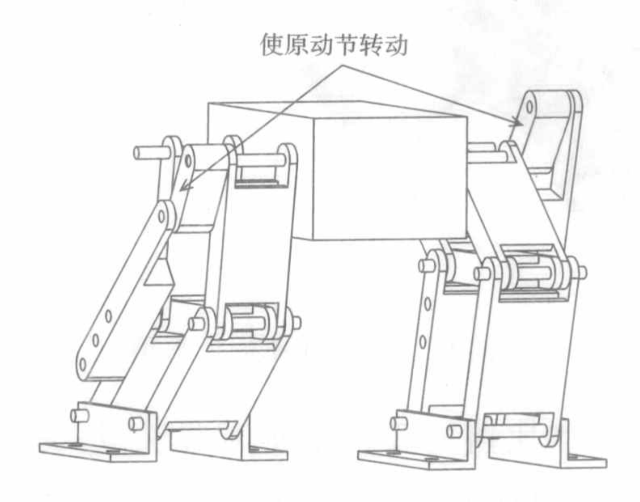


图1.5 两脚的切比雪夫联杆结构

1.2.2 传递动力的电机齿轮箱

我们来确定图1.5中切比雪夫联杆结构中，使原动节转动的原动力。

通常把发生动力的装置称为往复运动汽缸，但这里用直流电机作为使原动节转动的原动力。在往复运动汽缸中还有气压缸和油压缸等等，其对运动的机器人来说是不可缺少的要素。

直流电机也是被经常使用的动力，但如果直接使用的话，转速过快，一般用齿轮进行减速。

本书中的机器人用田宫的4速曲柄齿轮箱作为减速齿轮。此齿轮箱的减速比可以从126:1的高转速到5402:1的高力矩低转速进行4种选择，非常方便。另外，这种齿轮箱附带有曲柄杆，可以作为切比雪夫结构的原动节使用，如图1.6所示。

在此处，用于原动节的曲柄结构可以把转动变成往复直线运动，也可反过来把往复直线运动变成转动，是经常被使用的一种结构。本书中要制作的双足步行机器人，需要把原动节的转动变成中间节的往复运动。

在第1章中使用于脚的减速齿轮，其减速比为441:1，请参考组装说明书，按4速曲柄齿轮箱的B型进行组装。

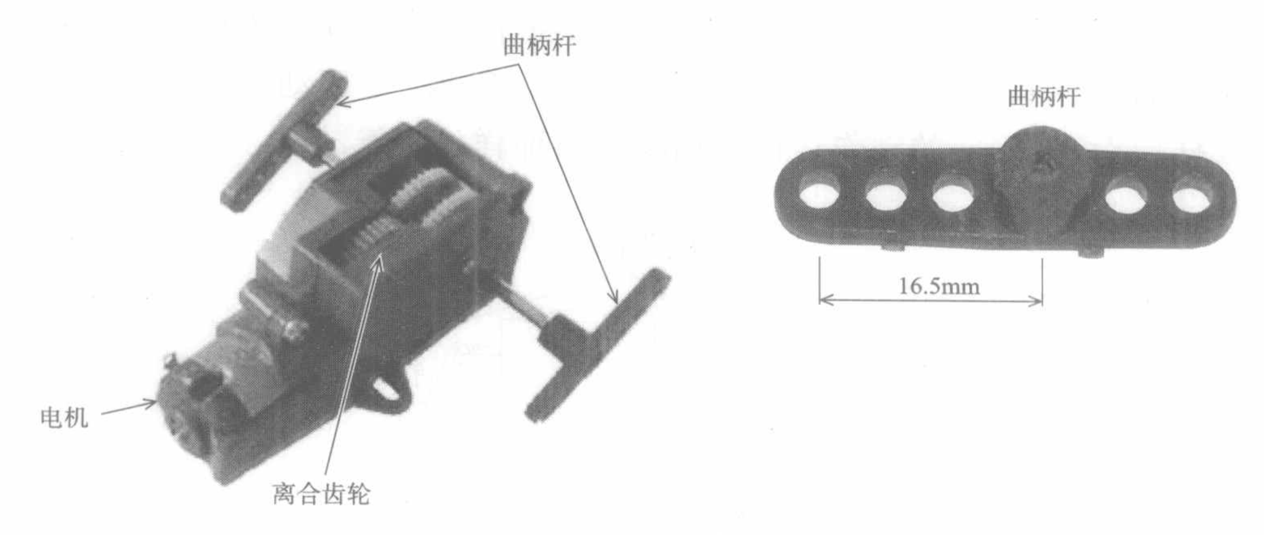


图1.6 田宫4速曲柄齿轮箱

在说明图1.3所示切比雪夫联杆结构时曾说过，原动节、固定节、从动节、中间节、延长中间节的各个长度之间都存在一定的关系。

本书中的机器人，把4速曲柄齿轮箱所附带的曲柄杆用于切比雪夫联杆结构的原动节。测定一下，它的长度为16.5mm。原动节的长度一旦确定，其他节（杠杆）的长度便能确定下来，机器人脚的尺寸也可确定下来。

本书中制作的双足步行机器人的各节（杠杆）的长度见表1.2，请再次和图1.3～图1.5比较。

表1.2 本书中制作的双足步行机器人的各节的长度

切比雪夫联杆结构中各节的长度比		本书中的机器人所使用的长度	
原动节	1	原动节	16.5mm
静止节	2	静止节	33mm
从动节	2.5	从动节	41.25mm
中间节	2.5	中间节	41.25mm
延长中间节	2.5	延长中间节	41.25mm

1.3 基础脚的制作

1.3.1 材料及加工方法

确定脚的结构后便是加工制作，首先要确定使用何种材料。在第1章制作脚时所需要的材料见表1.3。笔者当初使用的是丙烯材料，但丙烯材料脆性大、不易加工，开孔时经常因材料破裂而失败。后来使用了名为ABS的材

料，它是塑料的一种，易加工、价格适中，也有足够的机械强度，手感比丙烯柔软。也许你会有些不安，但请放心使用：若是一张平板，很容易弯曲；但做成立体结构的话，就有足够的强度，完全可以用作脚的材料（请参考图1.7及“实验·理解：形状和强度”）。使用ABS材料的最大理由还是易于加工，如果实在需要提高强度的话，也可以使用一部分铝。金属！请不要吃惊，只是很薄的铝片，不难加工。

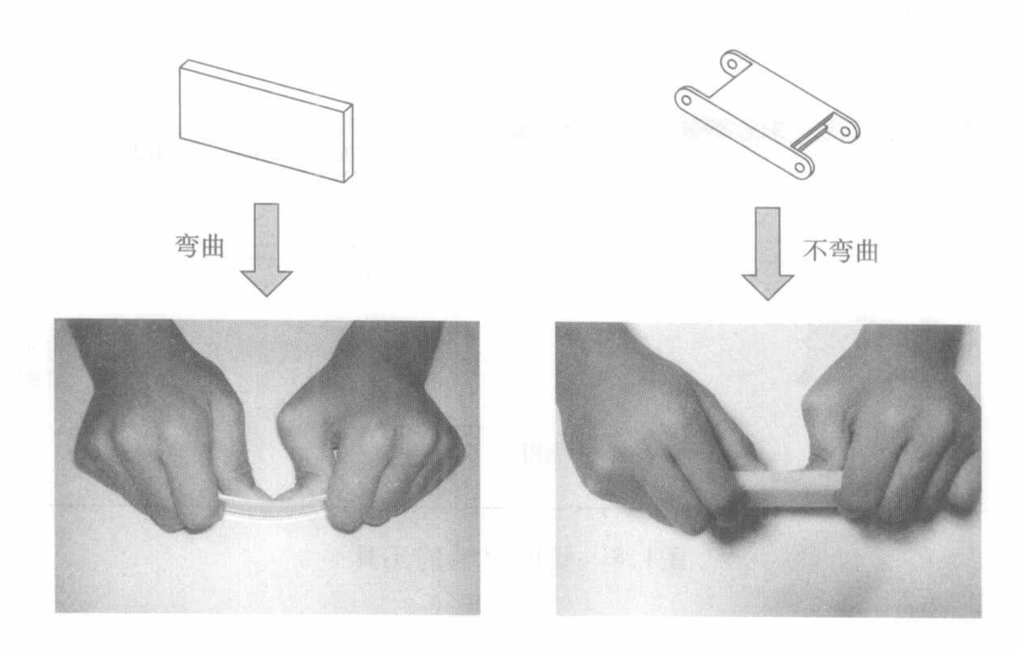


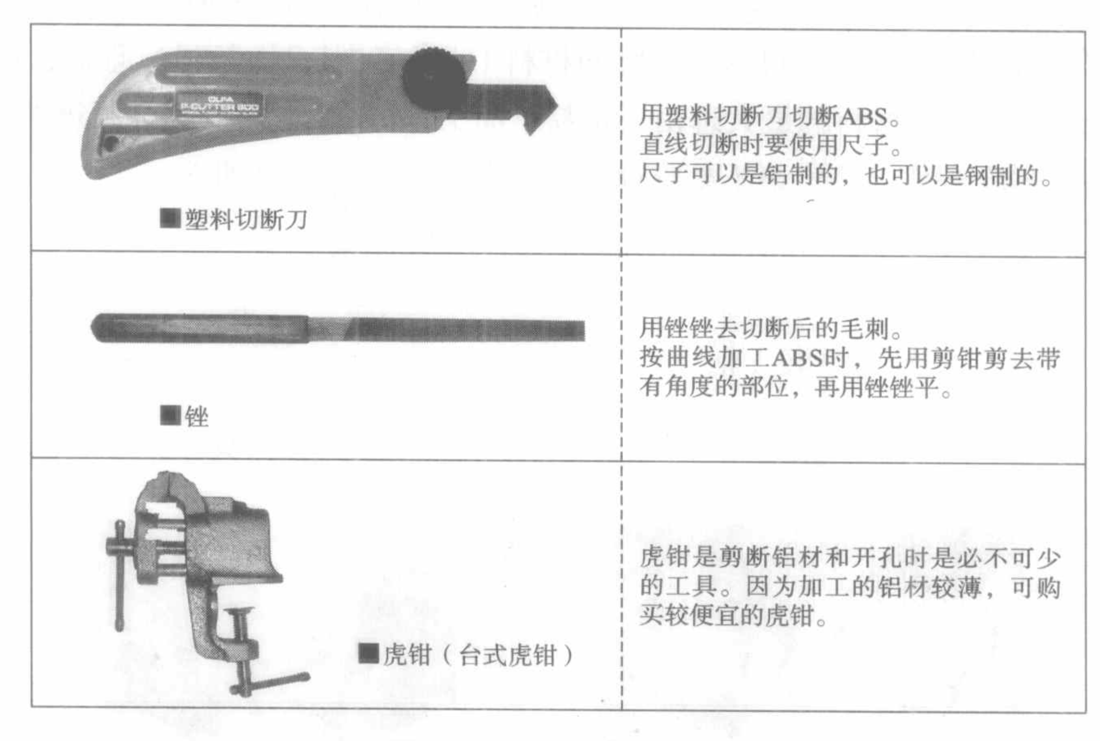
图1.7 在形状上想办法增加强度

表1.3 在第1章制作脚时所需要的材料

品 名	规 程	数量	购买地点	单价/日元
ABS板	330×245，厚2.0mm	1	东急HANDS	546
方形铝管	1m，10×10×1.0（A6063）	1	东急HANDS	620
角铝	1m，12×12×1.2（A6063）	1	东急HANDS	370
支撑柱	ϕ3.1×22	2	铃商	10
M3螺钉	M3×30	16	商店	5
M3螺钉	M3×12	10	商店	5
M3螺母	M3	28	商店	5
垫片	M3	8	商店	5
ABS粘接剂		1	东急HANDS	203
田宫齿轮箱	4速曲柄齿轮箱	1	模型店	570
黄铜圆杆	ϕ3×300mm	1	商店	100
带开关的电池盒	3号×2节	1	秋月电子通商	60

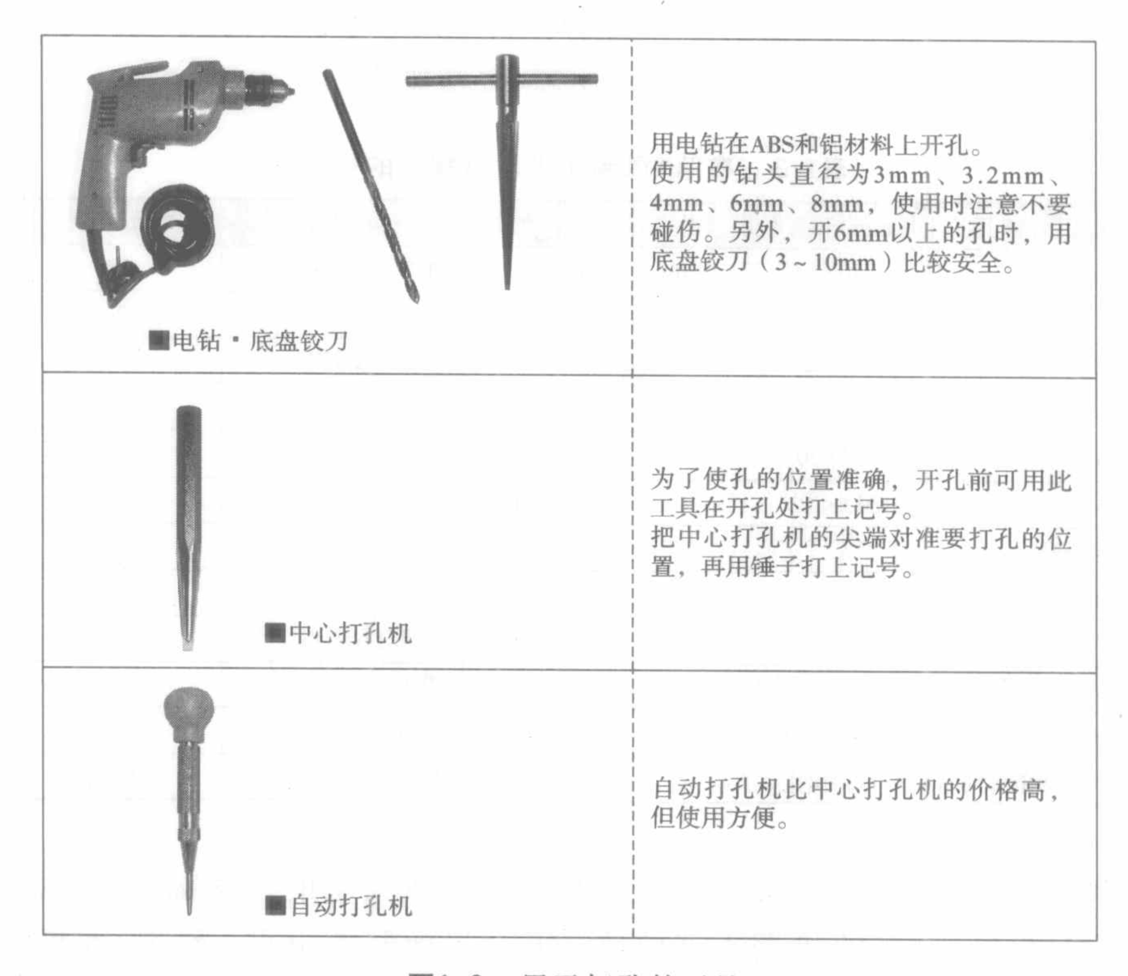
其次是加工方法。如果是在工业职业高中或大学的工学部，制作器械和测量工具齐全，本书的机器人可精确、短时间地制作出来。然而，本书的目的就是在不具备制作环境的业余条件下也要能制作出双足步行机器人。因此，让我们

用商店里能买到的工具来制作双足步行机器人，如图1.8~1.10所示。



工具	说明
■塑料切断刀	用塑料切断刀切断ABS。 直线切断时要使用尺子。 尺子可以是铝制的，也可以是钢制的。
■锉	用锉锉去切断后的毛刺。 按曲线加工ABS时，先用剪钳剪去带有角度的部位，再用锉锉平。
■虎钳（台式虎钳）	虎钳是剪断铝材和开孔时是必不可少的工具。因为加工的铝材较薄，可购买较便宜的虎钳。

图1.8 切断材料的工具



工具	说明
■电钻・底盘铰刀	用电钻在ABS和铝材料上开孔。 使用的钻头直径为3mm、3.2mm、4mm、6mm、8mm，使用时注意不要碰伤。另外，开6mm以上的孔时，用底盘铰刀（3~10mm）比较安全。
■中心打孔机	为了使孔的位置准确，开孔前可用此工具在开孔处打上记号。 把中心打孔机的尖端对准要打孔的位置，再用锤子打上记号。
■自动打孔机	自动打孔机比中心打孔机的价格高，但使用方便。

图1.9 用于打孔的工具



图1.10 粘接剂

1.3.2 制作要点

脚的制作顺序如图1.11所示。

①设计：确定脚用零件的形状和尺寸，并在图纸上表示出来。

②划线：在材料上，按图纸尺寸画出开孔位置和要切断的部位。

③加工（开孔、切断）：按照划线位置，在要开孔的地方用打孔机打印后开孔，在要切断的部位用塑料切断刀或金属锯切断。

④零件制作：把切断的材料用粘接剂粘接，制作所需要的零件数。

⑤组装零件：把各个零件组装成脚。

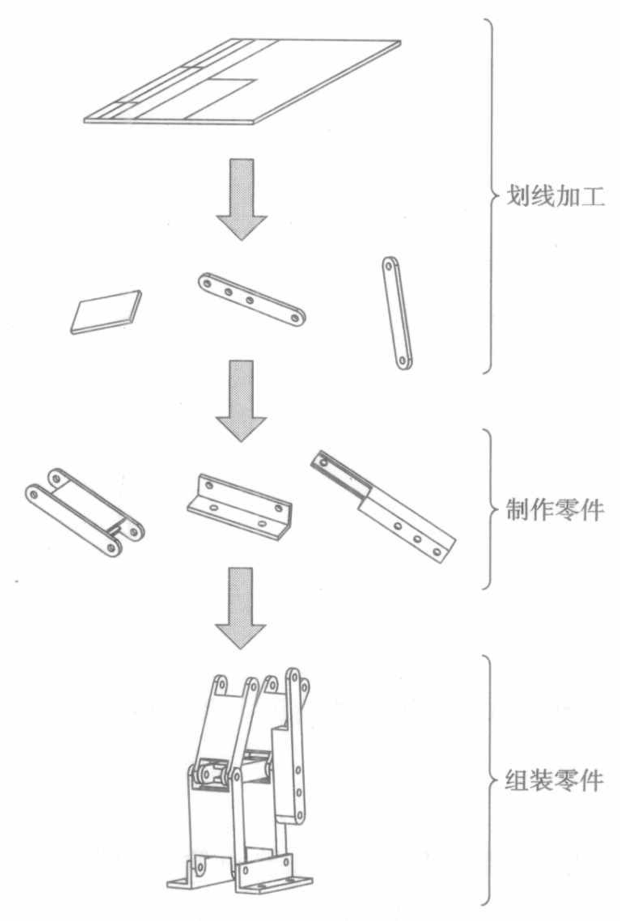


图1.11 制作顺序

制作的要点是加工要准确，如图1.12所示。脚是零件的汇集处，要使做出的脚能够圆滑地动作，各个零件的加工尺寸必须准确。为此，在上述的各个流程中要慎重作业。

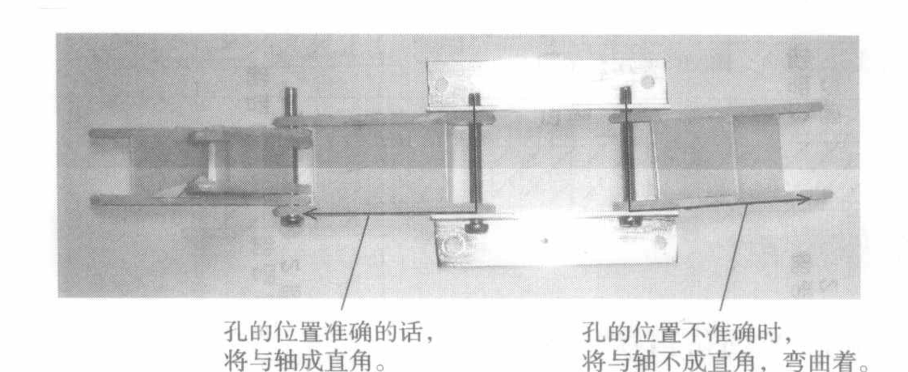
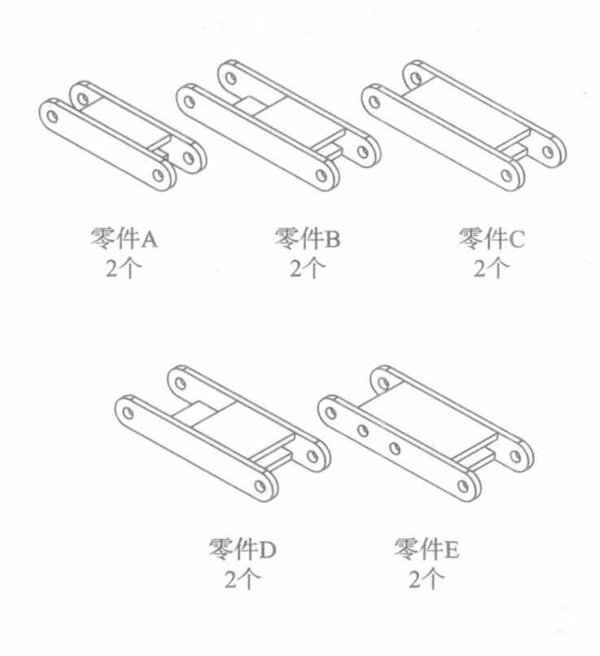


图1.12　零件的加工要准确

要制作的零件如图1.13所示。零件A、零件B、零件C、零件D、零件E分别制作2个，也就是左、右两只脚的零件。



零件	材料	个数
A	E	4
	G	4
B	A	2
	B	2
	F	4
C	A	4
	F	4
D	C	2
	D	2
	F	4
E	C	4
	H	4

图1.13　制作零件的种类及材料明细

1.划线加工

第1步，制作组成这些零件的材料：材料A　6个，材料B　2个。从ABS板中剪切出图1.14的材料。ABS板的尺寸为长330mm×宽245mm，按图1.14配置后划线。

把相同宽度的材料统一配置后，材料在宽度方向的尺寸误差将会减少。划线时，尽量用细铅笔或圆珠笔；记号笔的线太粗，易产生误差。

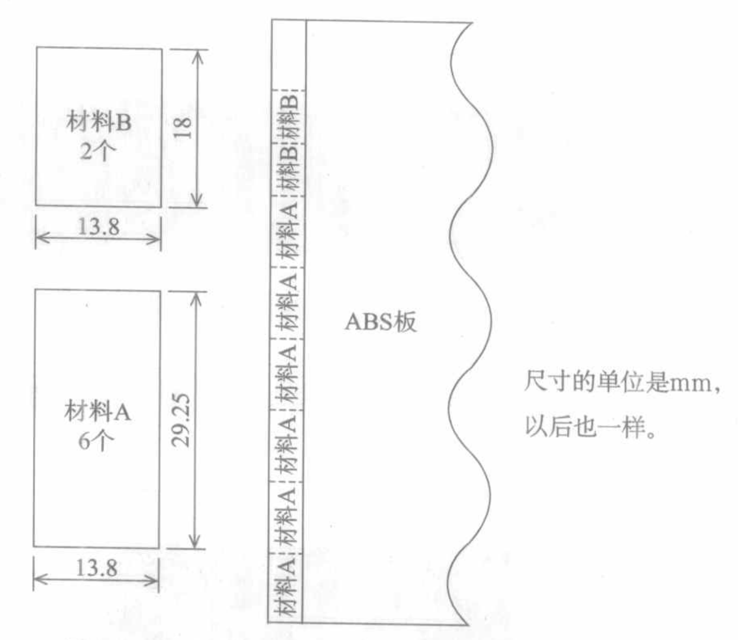


图1.14　材料A和B的尺寸及配置图

把材料A和材料B在ABS板上划线后切断。ABS板上并没有把所有的材料都划线，这是因为塑料切断刀是有厚度的。笔者手头的切断刀厚度为0.6mm，如果按图1.14划线再用切断刀切断，材料的尺寸就会减少0.6mm。不受此误差影响的部分是图1.14配置图中的虚线部分，而实线部分会因这个误差影响零件的精度。

因此，先把第1列的材料划线、切断（需要开孔的材料开孔后再切断），再将第2列的材料划线、切断。按此顺序对材料进行加工。

切断时，用尺子对准材料上的划线，不要忘记了切断刀的厚度，如图1.15所示。

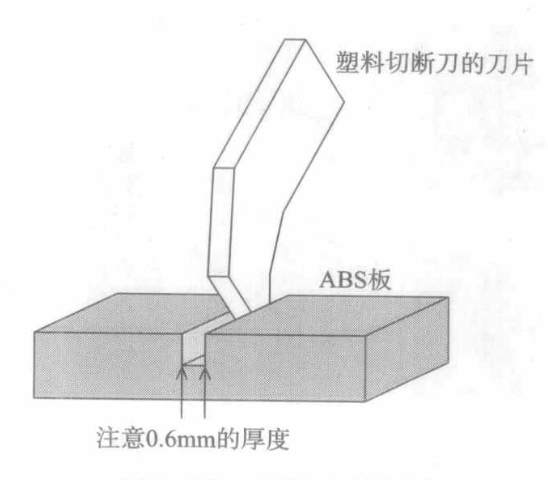


图1.15　切断刀的厚度

把塑料切断刀沿着尺子切下去。因ABS板和尺子容易滑动，只用手按住的话很难固定。按图1.16所示在尺子的背面贴上双面胶，这样就不易滑动。

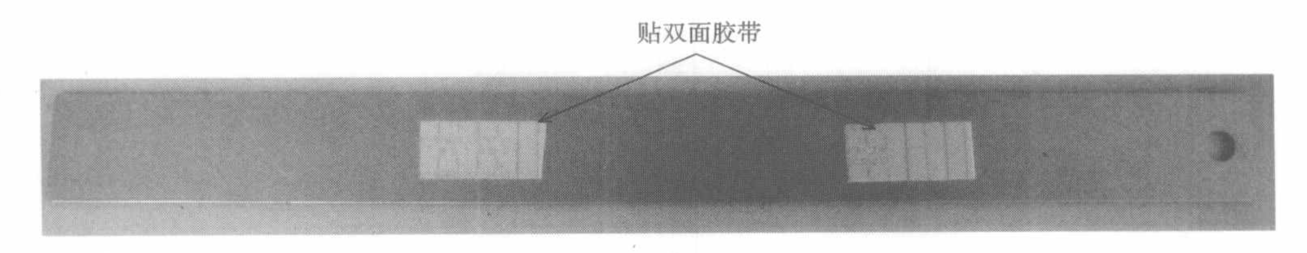


图1.16 在尺子的背面贴上双面胶带

再者，塑料切断刀相对于材料而言要垂直竖立，如图1.17所示。如果不这样的话，切断面将是斜面。

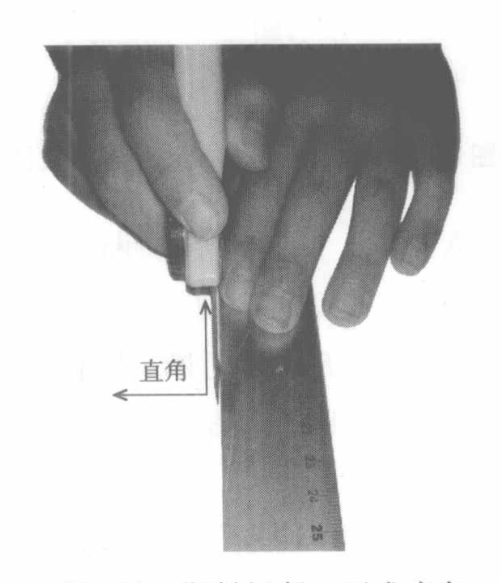


图1.17 塑料切断刀要成直角

把塑料切断刀沿着尺子切划十几次，一点一点地切断，如图1.18所示。

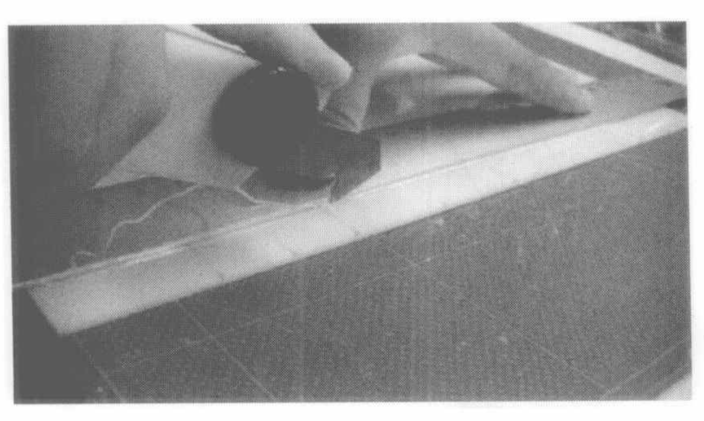


图1.18 一点一点地切断

用塑料切断刀切几次后，虽然可以用手沿着切割线掰断，但这样会造成断面参差不齐，影响精度。在特别要求精度的部位，不要用手掰断，而要用切断刀切断。

切断后，再用锉除去毛刺。如图1.19所示，用左手拿住材料，右手握住锉，轻轻地锉有毛刺的部位，注意用力要适当。

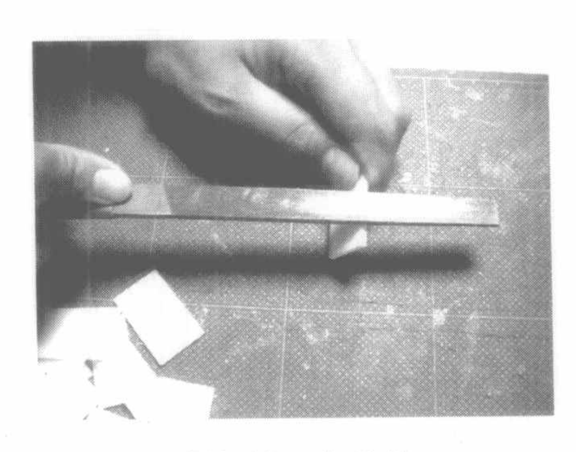


图1.19 去毛刺

第2步，加工6个材料C和2个材料D。按图1.20所示的尺寸把材料配置后，在ABS板上画线。切断时要考虑塑料切断刀的厚度。

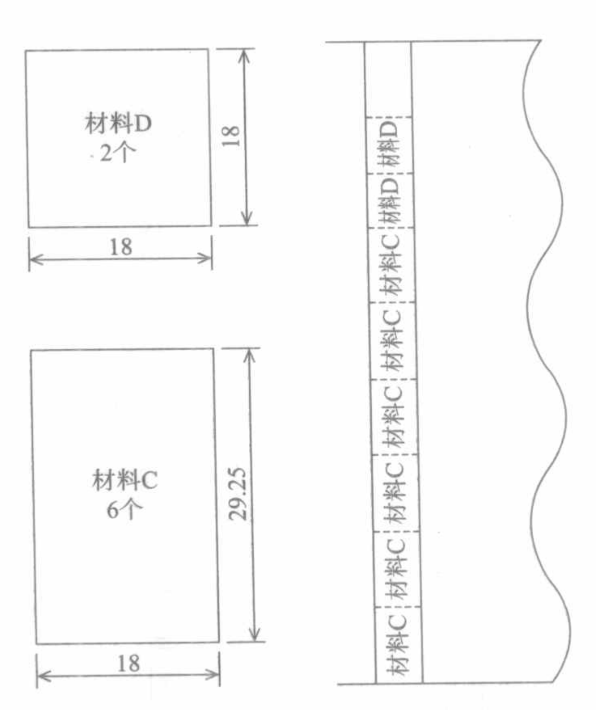


图1.20 材料C和D的尺寸及配置图

第3步，加工4个材料E，按图1.21在ABS板上配置后划线。切断时要考虑切断刀的厚度。

第4步，制作材料F、G、H。图1.22中的记号“$\phi3$”是“直径3mm的孔”的意思，这次将在材料F、G、H上开孔。按尺寸线划线后先开孔再切断。因为材料很小，切断后开孔是很危险的。在开孔位置上，线和线是交叉的，在交叉点上用打孔机打上记号。如果打的记号位置不准确，那么孔的位置也就错位了，所以一定要慎重地进行。

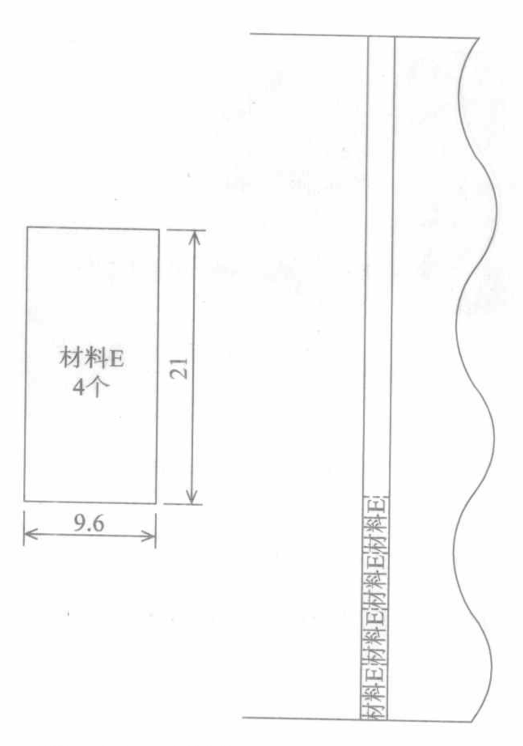


图1.21 材料E的尺寸及配置图

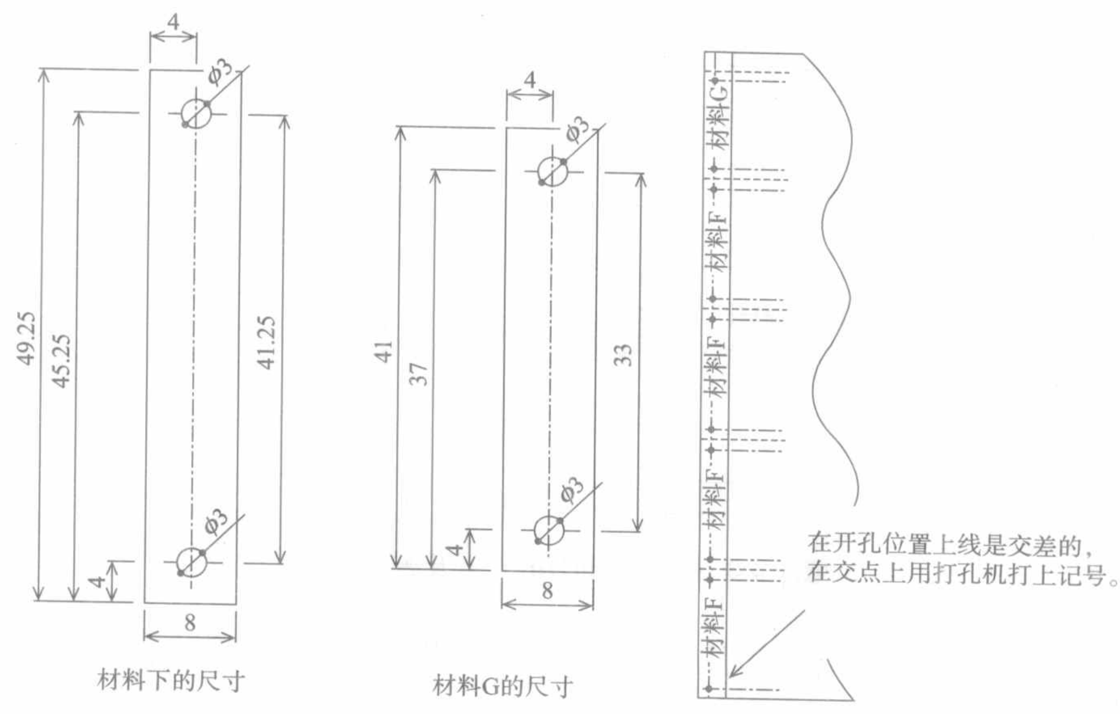


图1.22 材料F和G的尺寸及配置

图1.23是自动打孔机的使用例子。一手握住自动打孔机，对准孔的位置，另一手往下按压后便打上了记号。中心打孔机的使用方法与自动打孔机大致相同，只是打孔时不是用手按压的，而是用锤子，轻轻地敲打一次就打出了记号。如果用丙烯板的话，此种情况下极易出现裂纹或破碎；ABS材料便不会出现这种现象；背面上或许会留下少许痕迹，但还要接着用钻头开孔，所以不受影响。

把ϕ3的钻头对准打孔机打上记号的地方，钻要垂直竖立，要感觉到钻头是自然进入到记号坑里的。右手拿住钻，左手用力按住材料板，以免钻滑动时受伤。

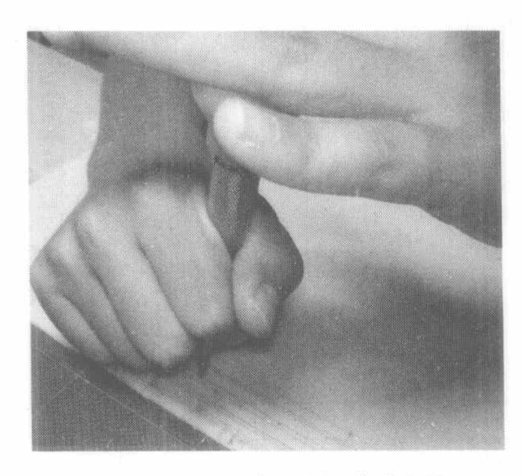


图1.23 用打孔机打记号

连续3次按照图1.22所示材料F和材料G的配置在ABS板上划线、切断。这样，便制作出12个材料F和3个材料G。

材料H按图1.24的尺寸，材料G按图1.22的尺寸，按图1.24配置，在ABS板上划线后切断。这样，加工出的材料H为4个，材料G加上前次加工的共4个。

由于还需要1个材料G，再按图1.22的尺寸划线加工即可。

第5步，加工制作齿轮箱的盖子，如图1.25所示。没有底盘铰刀的人开ϕ9的孔是很危险的，所以不要开孔，直接用塑料切断刀把图上的实线部分切掉。这一部分不要求精度，只要能把齿轮箱的轴的突起部位嵌入进去就可以了。

如果有底盘铰刀，先用钻开ϕ3的底孔，再用底盘铰刀把孔扩大到ϕ9。用钻打孔时，如果不把材料用力按压住的话，钻头就会卷起材料，这是很危险的。因此，最好请一位成年人帮助用力按压住，或用虎钳把ABS板固定后再打孔。

另外，从ABS板上切下之前，要先打孔，再按照尺寸正确地切断。如果先切断的话，因零件尺寸较较小，很难用虎钳压住，也就无法开孔了。

把2个孔都增加到ϕ9后，再用塑料切断刀沿实线部分反复切割。ϕ3、

ϕ4、ϕ3.2孔的位置必须要准确，由于其位置是很复杂的，可以先用打孔机把位置固定。一定要注意安全。

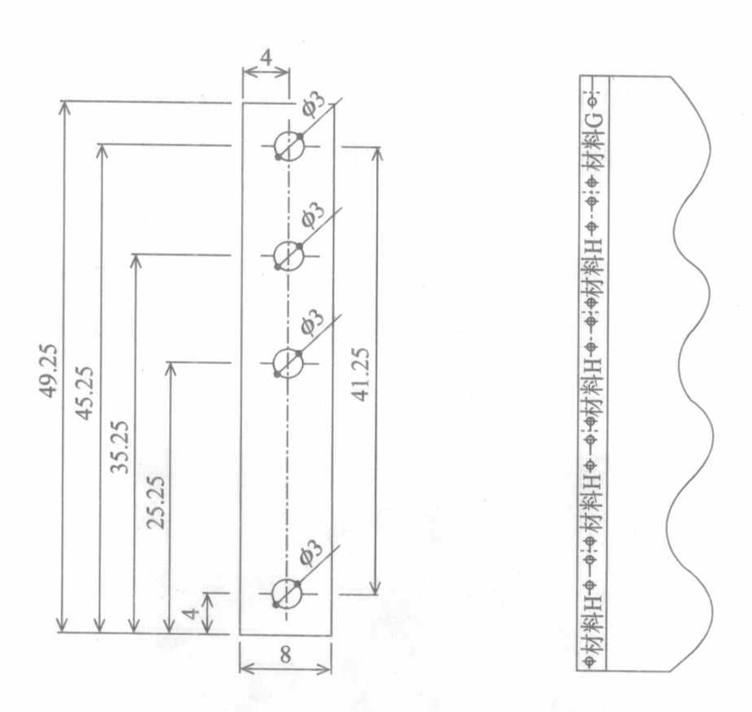


图1.24 材料H的尺寸和配置

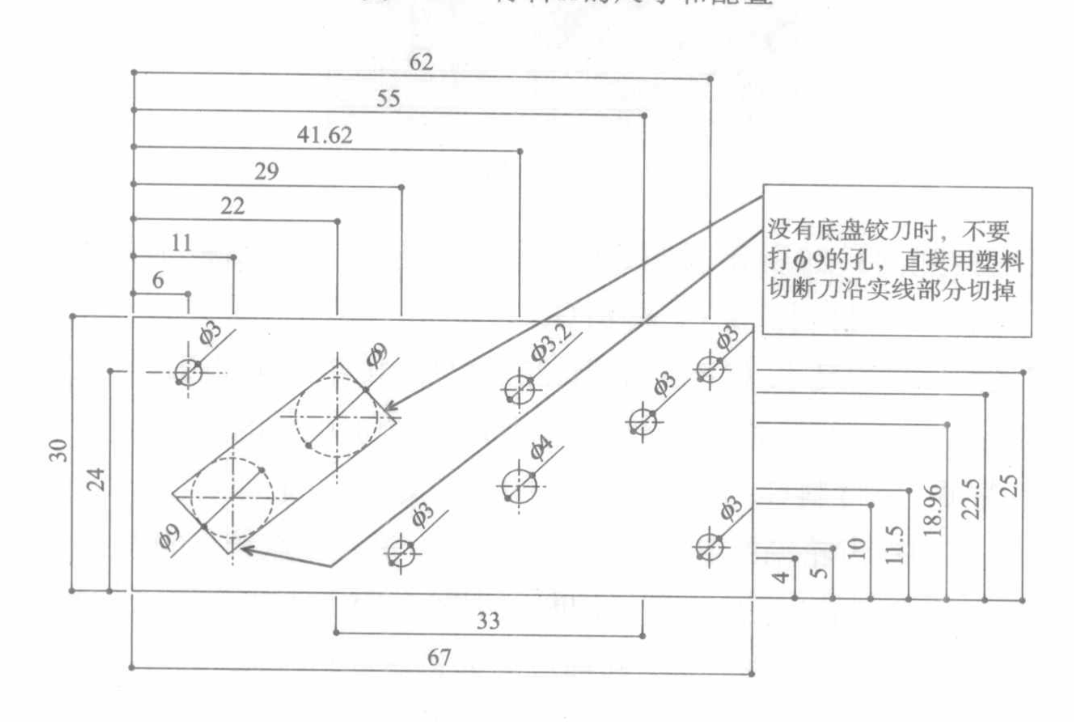


图1.25 齿轮箱盖子的尺寸

2.制作零件

在制作零件时，即便打孔、切断是很准确的，但粘接时偏斜的话，孔的位置也会偏斜。请再看一看图1.12。

为了不使孔的位置偏斜，粘接材料（图1.26）时，请准备图1.27那样的模型，对照模型进行粘接，特别是在ABS材料上划的孔的中心线要和模型纸上的中心线完全对合。配置并粘接材料是在模型纸上进行的，材料摆放之前要确认清楚。

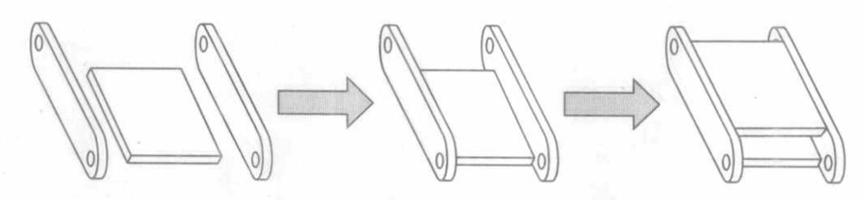


图1.26　粘接材料，制作脚部零件

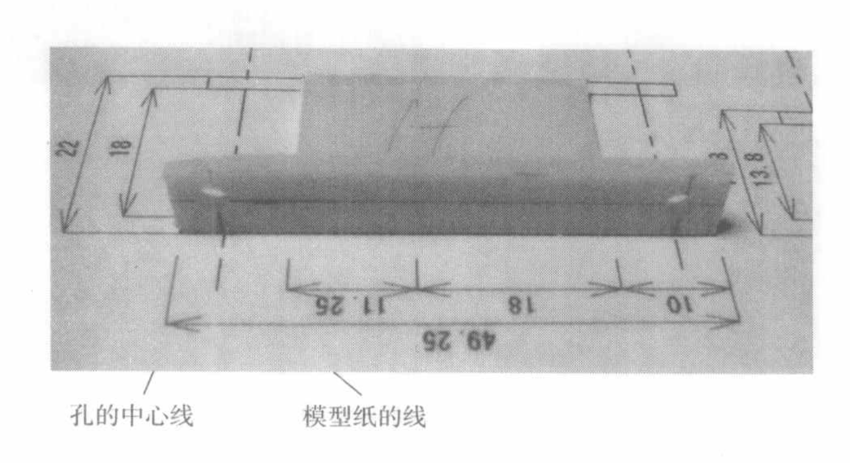


图1.27　模型纸的线和孔的中心线要对准

如图1.28所示，把侧面的板在模型纸上立起后，再对照模型纸上的线放上正面板。按这种方法摆好后，粘接所有的侧面板，如图1.29所示。

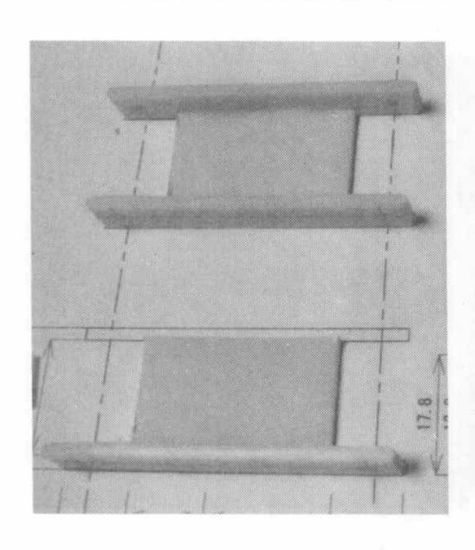


图1.28　在材料C上粘接材料F

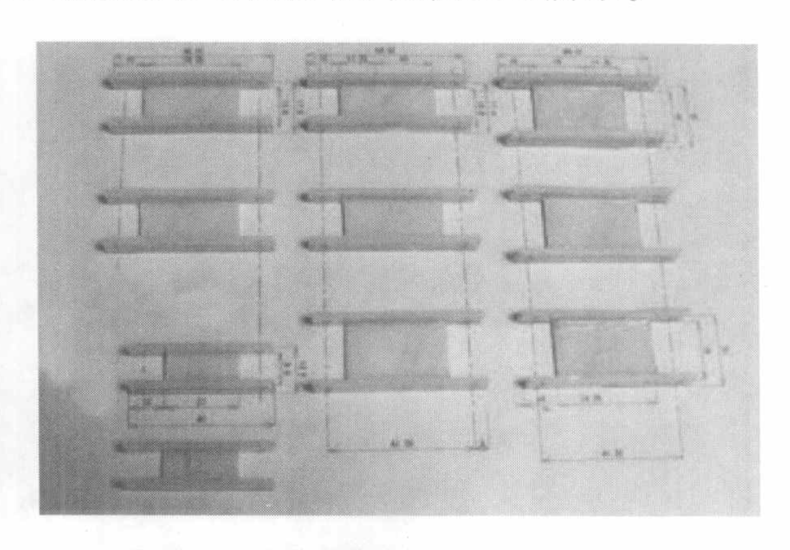
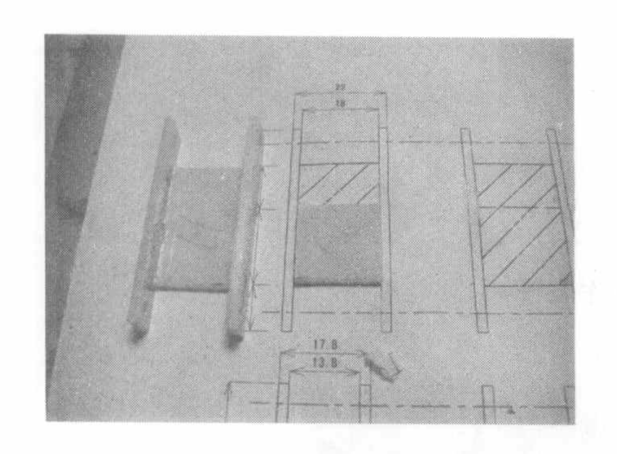
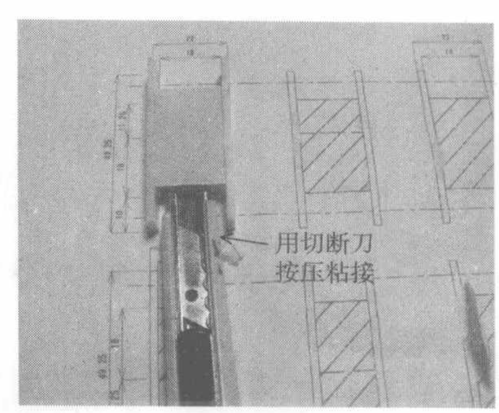


图1.29　在侧面板和正面板粘接好

如图1.30所示，在另一侧把粘接用板按照模型纸上的线放置，再把刚才粘接完了的一组板倒扣着放到新板上面。为了不使放在模型纸上的板悬空，要用切断刀按着粘接。





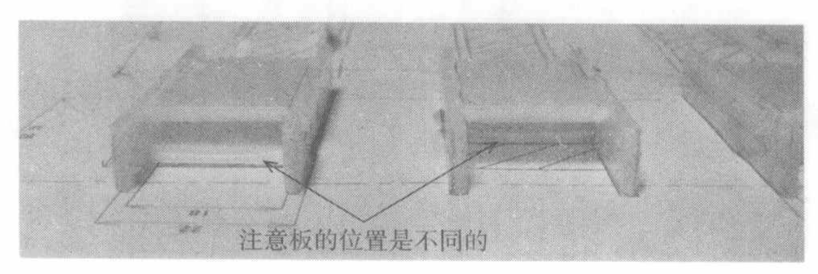


图1.30 在另一侧放置粘接板

从侧面可以看出，像零件D和零件E一样，放入里侧的板的位置也有不同，粘接时要仔细看清楚模型纸，不要把尺寸和位置搞错了。全部粘接完了后的零件如图1.31所示。

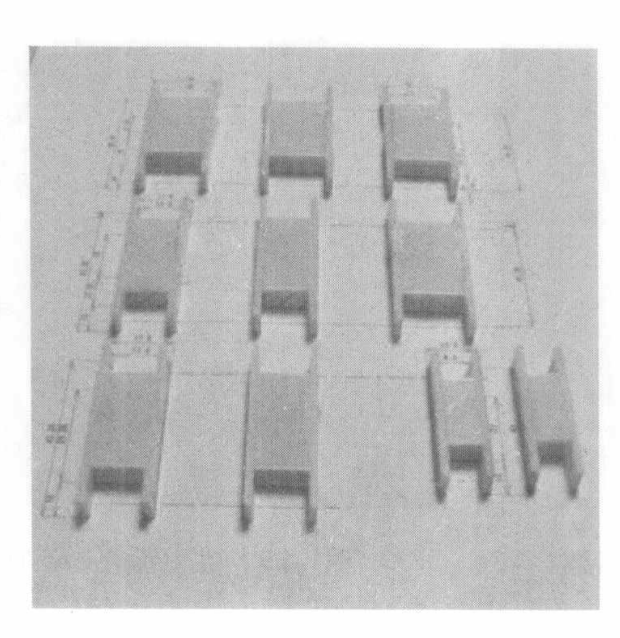


图1.31 粘接完了

制作好的零件有棱角，但组装成脚后有时会触碰别的东西，所以最好用剪钳切去单侧4个、双侧8个棱角，如图1.32所示。如果想使棱角成圆弧状的话，再用锉锉成圆形即可。

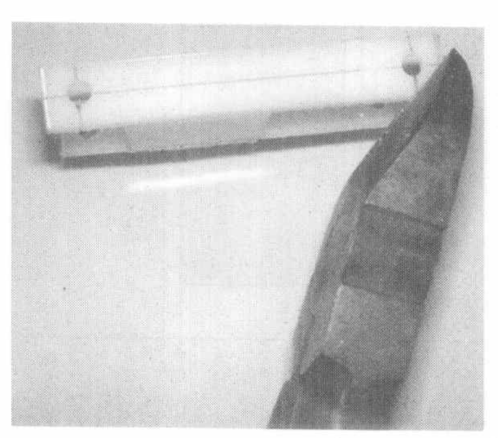


图1.32 用剪钳切去棱角

图1.33是粘接用的模型纸，和实际尺寸一样大小，可以复印后使用。应注意的是，零件A的模型只有1个，但实际零件是2个；零件E的侧面所用的板不是带有2个孔的材料F，而是带有4个孔的材料H。

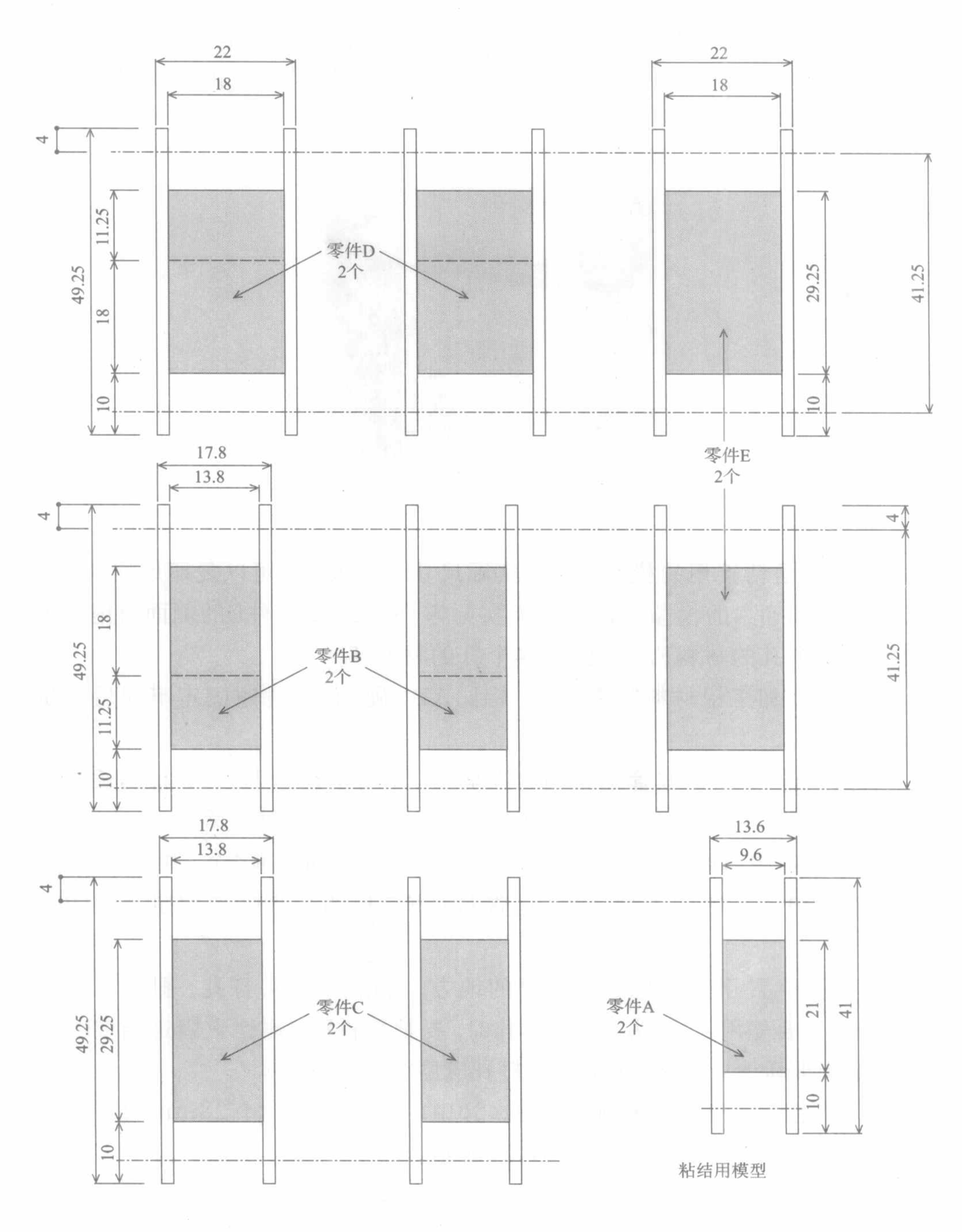
接下来，加工铝材料制作零件。铝比ABS硬，但用虎钳固定牢固后还是可以加工的。

加工零件F时，把方管铝材固定在虎钳上，用钢锯按71.25mm的长度锯成2根。钢锯是在推的时候切割，和木工用锯相反，这点请注意。

划打孔的中心线。材料F在表面上有3个孔，背面上有4个，共7个孔。表面和背面的3个孔的位置是一致的。像材料F这样的小零件要固定在虎钳上划线。

在打孔位置用打孔机打上记号的地方，再用ϕ3钻头打孔。图纸上标有ϕ8的孔，也要先用ϕ3钻头打孔。打孔时，要把零件F在虎钳上固定结实以后进行，钻头要垂直，如图1.34所示。打孔顺序如图1.35所示。

零件F还需要进行切割加工。图1.36中，在零件F上标有28mm的部位要用钢锯切割。加工好的零件F如图1.37所示。



* －·－·－·－·－·－·－·－· 此线表示孔的中心线
* 和实际尺寸一样大小请复印使用

图1.33　粘接用模型纸的尺寸

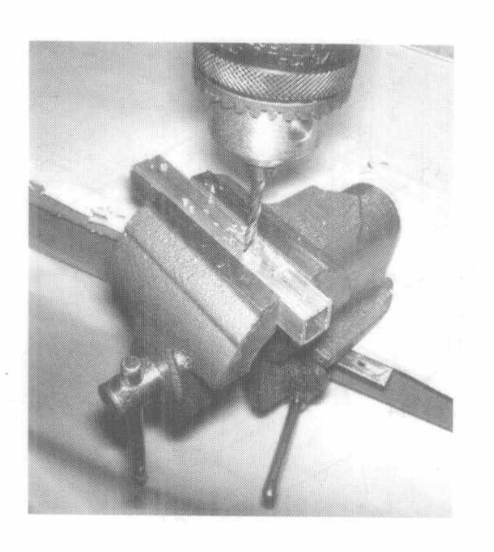
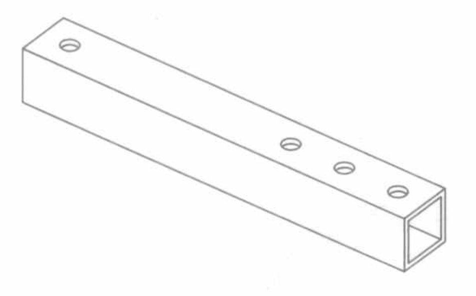
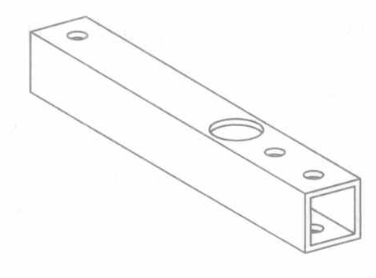


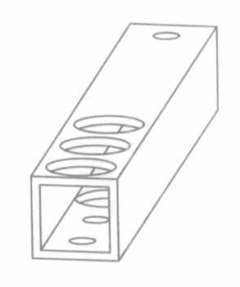
图1.34 固定在老虎钳上打孔



(a)在背面开8个ϕ3的孔



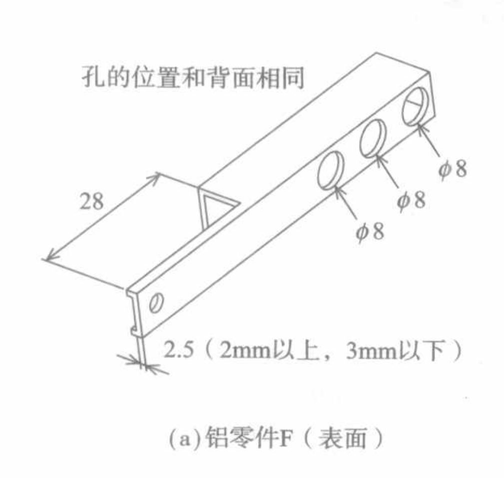
(b)用ϕ6和ϕ8的钻头把ϕ3的孔增加到ϕ8



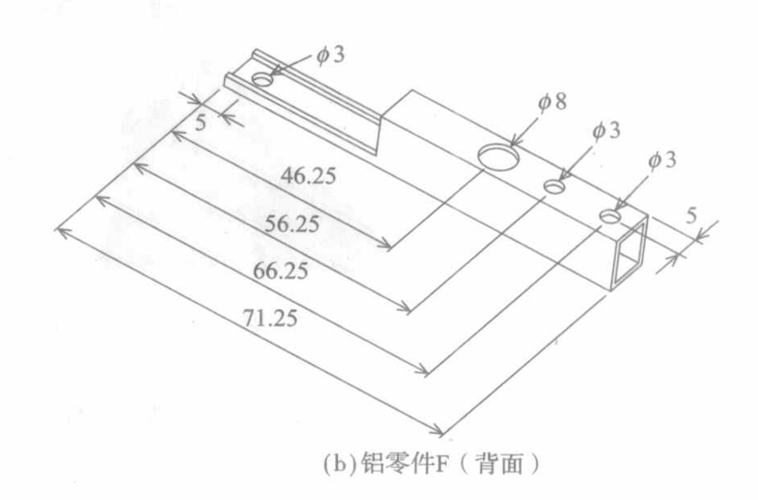
(c)在背面，用ϕ6和ϕ8的钻头把3个ϕ3的孔增加到ϕ8

图1.35 零件F的打孔顺序

铝材在加工后也会产生毛刺，所以同ABS材一样，也要用锉去毛刺，如图1.38所示。特别是在图1.35中指定的2.5mm（大于2mm，小于3mm），如果成品超过3mm的话，转动时就可能不顺滑，所以成品的高度要用锉来调整。

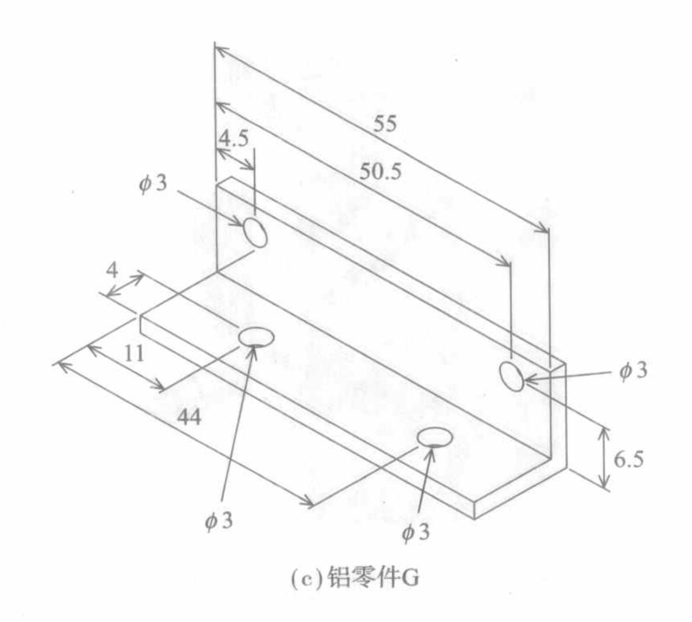


(a)铝零件F（表面）



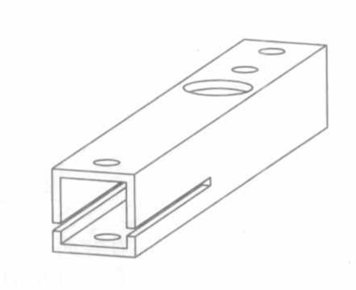
(b)铝零件F（背面）

图1.36 铝零件的尺寸

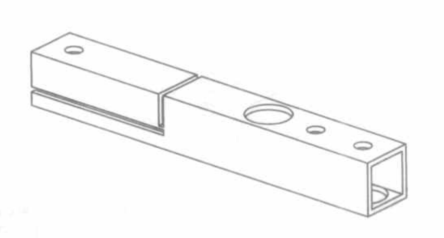


(c)铝零件G

图1.36 铝零件的尺寸(续)



(a)按照图纸把厚度2.5mm的方管切割到28mm



(b)按照图纸从28mm处纵向切割



图1.37 零件F的加工

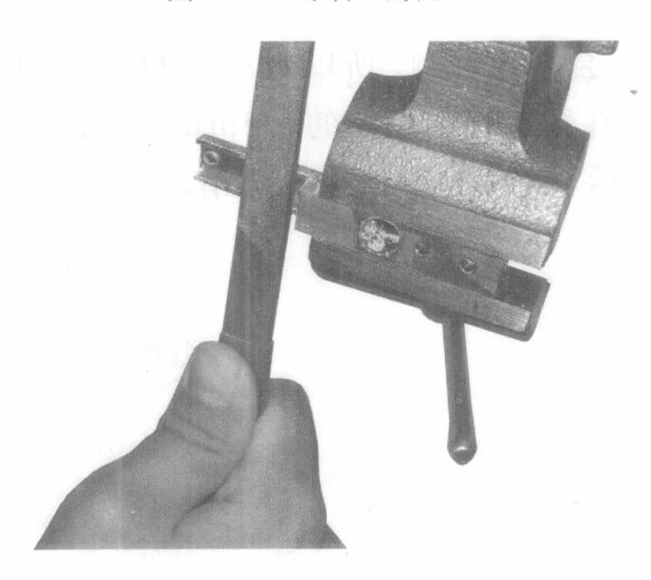


图1.38 用锉调整高度

零件G也同样，把L型铝材料固定在虎钳上，用金属锯按55mm的长度锯成4根。

在材料G上划4个孔的中心线，先用打孔机打上记号，再用钻头打孔。4

个孔的直径均为$\phi 3$。

切断铝材的窍门是在虎钳上固定结实。虎钳应该固定在像桌子那样的台子上，但家庭用的桌子有时没有足够的空间，这时可以把虎钳固定在桌子下方的腿上，如图1.39所示。使用时的角度虽然比通常转动了90°，但可以结结实实地固定住，便于锯断铝材并可以打孔。

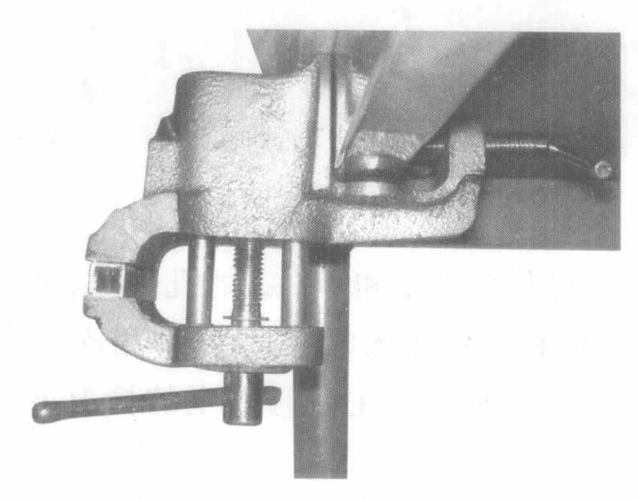


图1.39 把虎钳结实地固定在台子上

图1.40是加工好的零件F和零件G。让我们看一看零件F的断面，它是脚中间节的零件，但和原动节相组合的部分是凹形的，也就是刚才用锉调整到小于3mm的地方。

加工ABS材料时，曾多做了一个材料G。在这里，把那个多余的材料G用剪钳切成两半，像图1.41那样把一半的材料G嵌到零件F的凹处。如果加工准确的话，只要把材料嵌进去就可以固定结实；如果比较松的话，就要用粘接剂固定。增加这个材料G的目的是为了使零件F和原动节之间的接触比较顺滑。

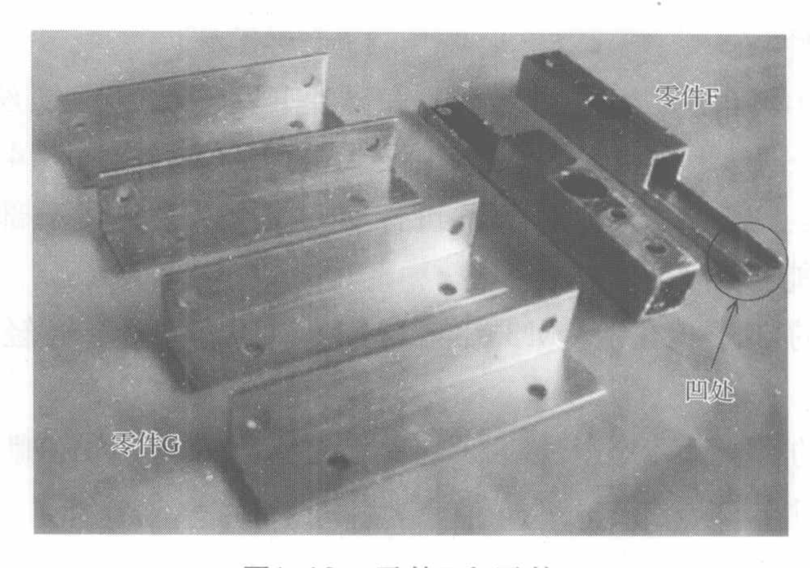


图1.40 零件F和零件G

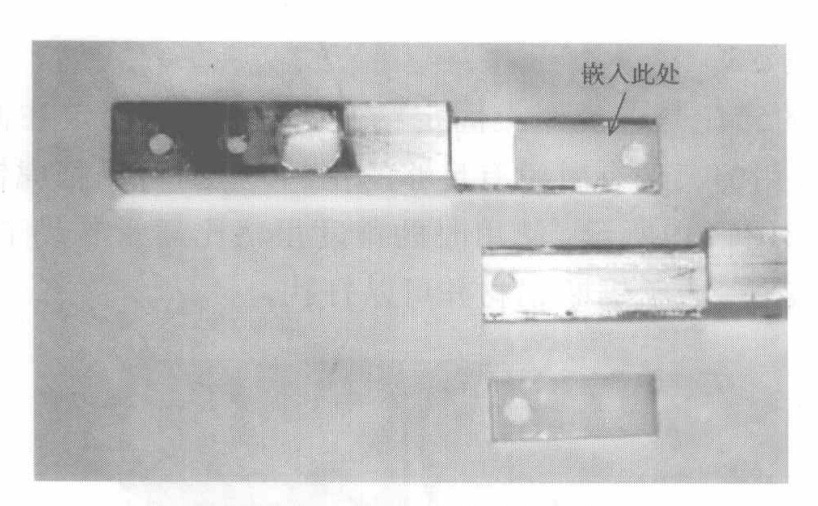


图1.41 嵌入零件F的凹处

另外请注意，要使材料G的孔和零件F的孔一致，如果错位的话轴就穿不过去。为以防万一，把材料G嵌入零件F后，要用ϕ3的钻头在孔中慢慢地转动着通过此孔，如图1.42所示。在注意安全的情况下，把零件F固定在虎钳上。

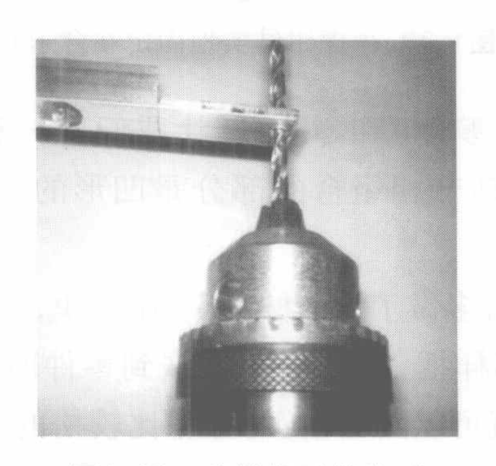


图1.42 孔错位时的修正

3.组装零件

在2个脚面零件G之间放入零件D和零件E后，穿入M3螺丝。请注意，零件E有2个孔的一侧要在M3螺丝（M3×30）的另一端，如图1.43所示。

在M3螺丝上安装螺母。螺母不可拧得过紧，以后在可动部位安装M3螺母时也同样不能拧得过紧。

在零件D的那一端，穿入M3螺丝（M3×30），用螺母轻轻地固定住，如图1.44所示。

在零件E的那一侧，放入零件C，和零件A同时穿入M3螺丝，再用螺母轻轻固定住，如图1.45所示。

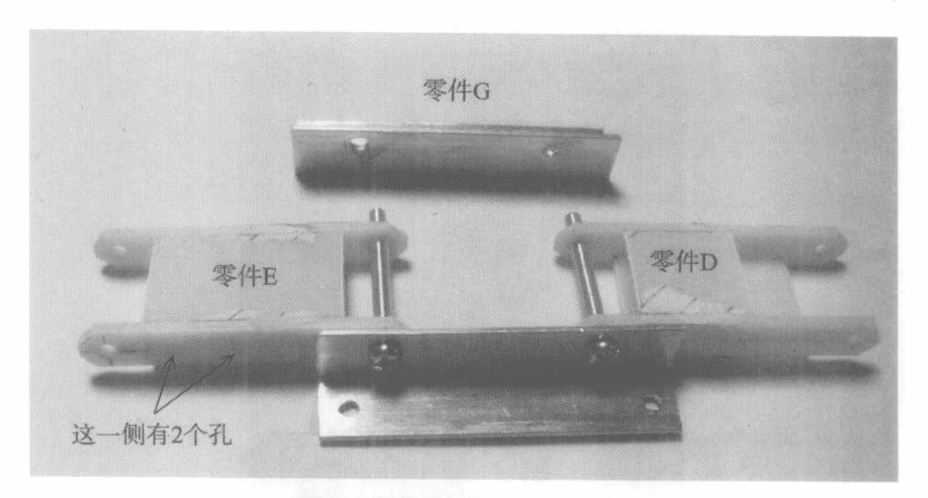


图1.43 组装零件E和D

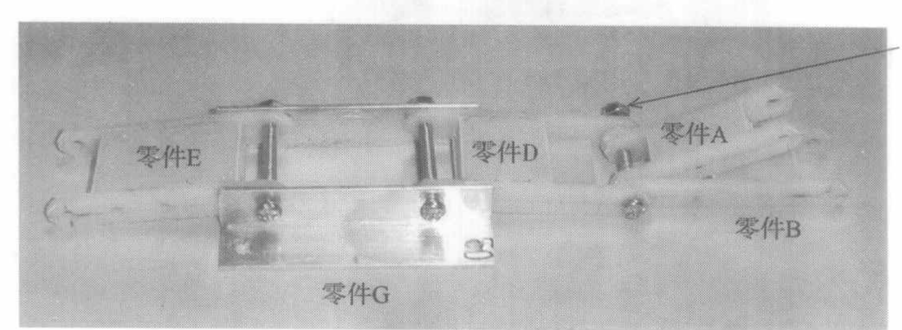


图1.44 放入零件A和零件B

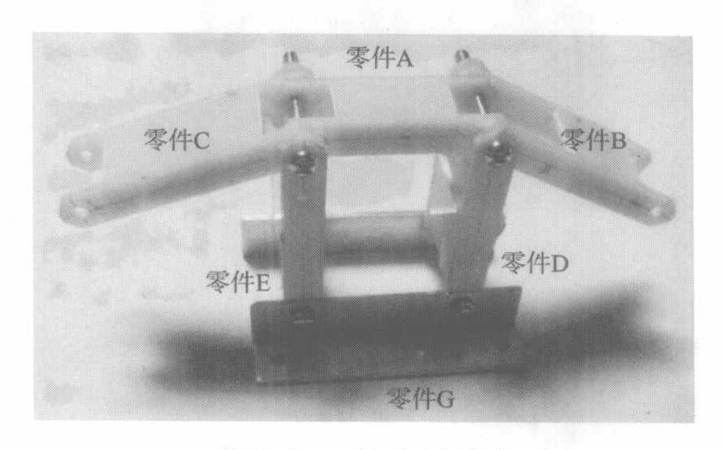


图1.45 放入零件C

在零件E的那一侧，用2根M3螺丝（M3×30）固定零件F，在里侧用螺母固定结实后便完成了一只脚的组装，如图1.46所示。注意：螺母只在此处固定结实，在其他可动部位只轻轻旋上即可；不然的话，可动部位便不能动作。

按同样的方法组装另一只脚。

4.加工齿轮箱

组装完毕后的齿轮箱有3根螺丝，把其中的2根拆卸下来，用ϕ3的钻头把2个螺孔加工成贯通孔，如图1.47、图1.48所示。

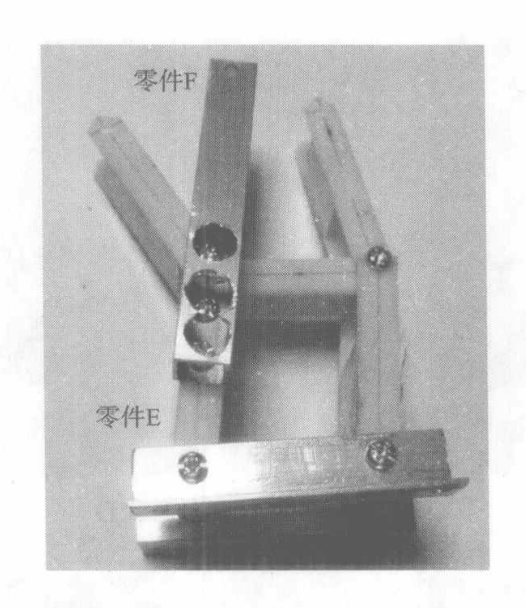


图1.46 用M3螺丝固定零件F

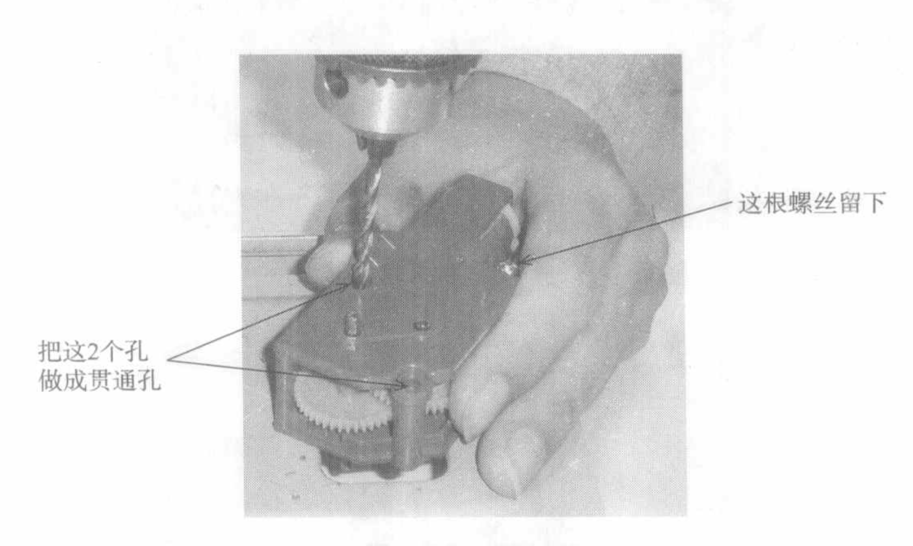


图1.47 用钻通孔

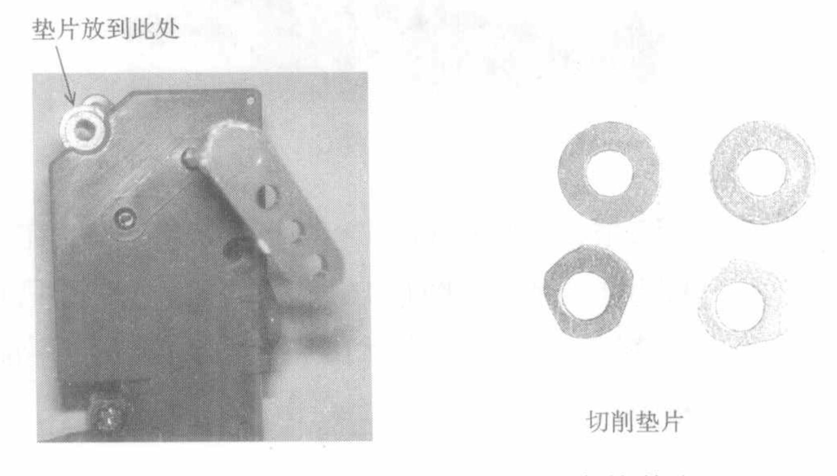


图1.48 加工垫片，放到齿轮箱上

调节曲柄齿轮箱附带的轴的长度，如图1.49所示。在装着曲柄杆的情况

下，轴的长度要调节为93mm，所以轴本身的长度应为87mm。按长度用锯锯断轴，锯断时要用虎钳固定结实，最后用锉把毛刺去除干净。

曲柄杆的另一侧（有2孔的一侧），对原动节来说是多余的，所以要用剪钳剪去，如图1.50、图1.51所示。

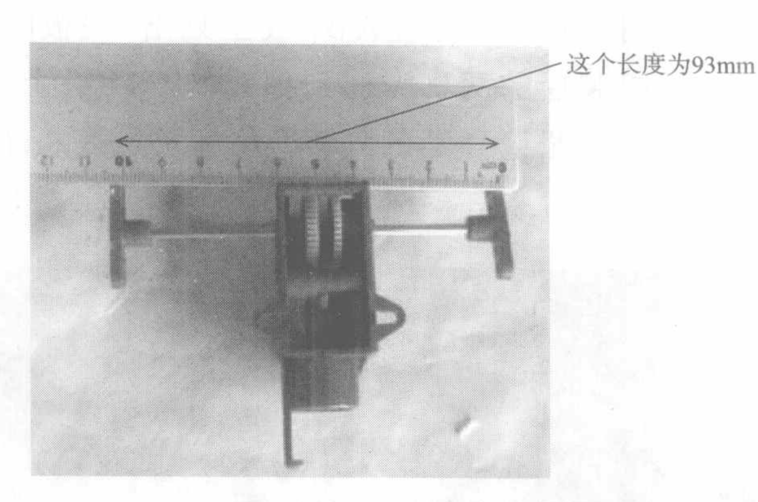


图1.49 调节轴的长度

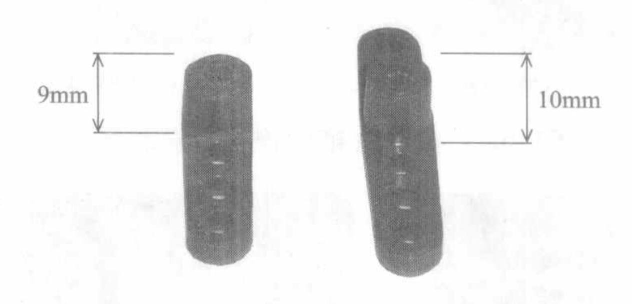


图1.50 削去曲柄杆的厚度

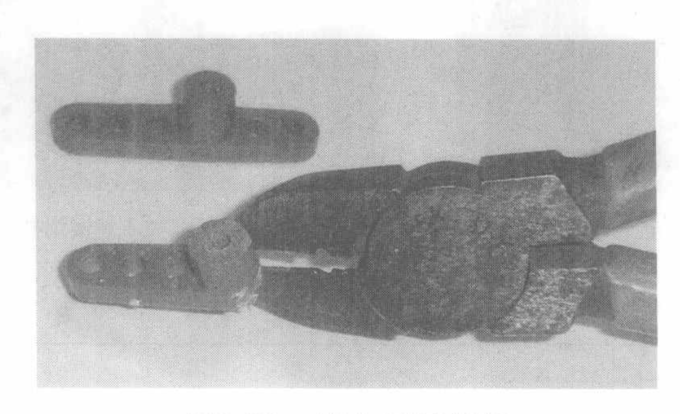


图1.51 把曲柄杆剪断

把ϕ3的黄铜圆杆固定在虎钳上，用钢锯截下130mm的长度后再用锉去毛刺。这是机器人后腿用的轴。

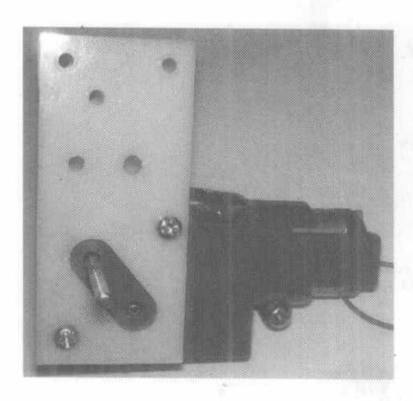
把齿轮箱的盖子，2根支撑柱、6个垫片、4根M3螺丝（M3×30）、4个M3螺母、黄铜圆杆、加工后的曲柄杆及加工后的齿轮箱进行组装。

把齿轮箱的盖子按图1.52那样放在齿轮箱的左右两侧后，用2根M3螺丝和螺母固定住。

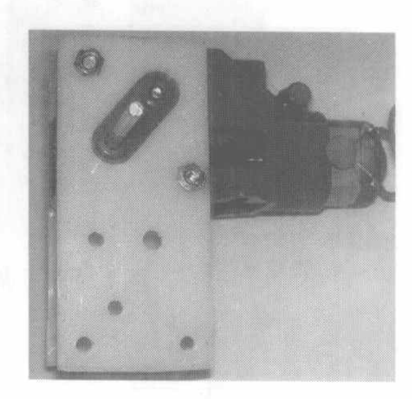
把支撑柱和3个垫片夹在齿轮箱盖子之间，用螺丝和螺母固定。再把130mm长的黄铜圆杆插入齿轮箱盖子的孔里。如图1.53所示。

制作脚底板，先按图1.54的尺寸在ABS板上划出2块板的线。

如图1.55所示，把组装后的两只脚放到划线的ABS板上，再用记号笔画出出零件G中孔的位置。按照记号笔的划线，在每块足底板上分别打4个$\phi 3$的孔。

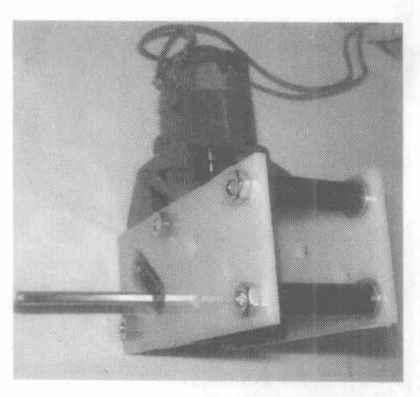


(a)穿入M3螺丝

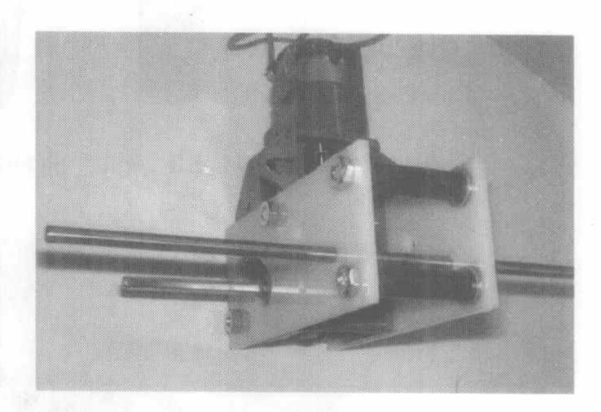


(b)用螺母固定

图1.52　在齿轮箱的盖子上安装零件



(a)用螺丝固定支撑柱和垫片



(b)插入黄铜圆杠

图1.53　插入黄铜圆杆

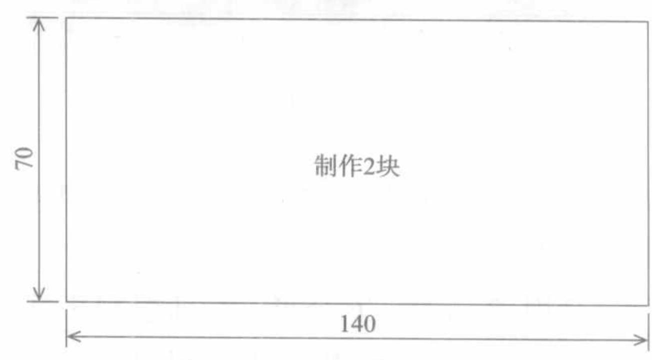
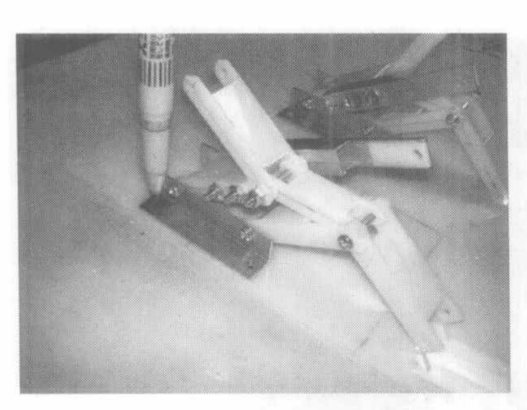


图1.54　脚底板的尺寸



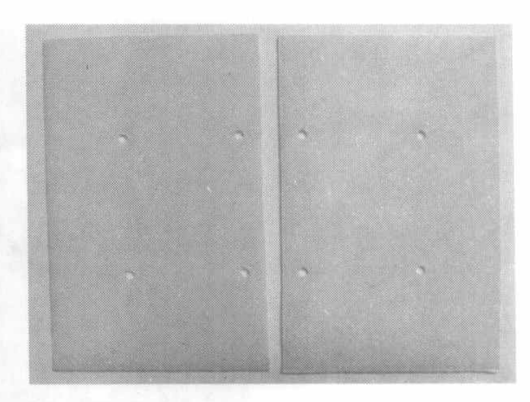
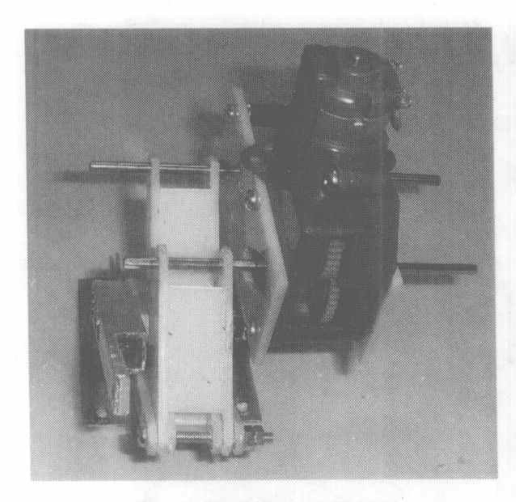
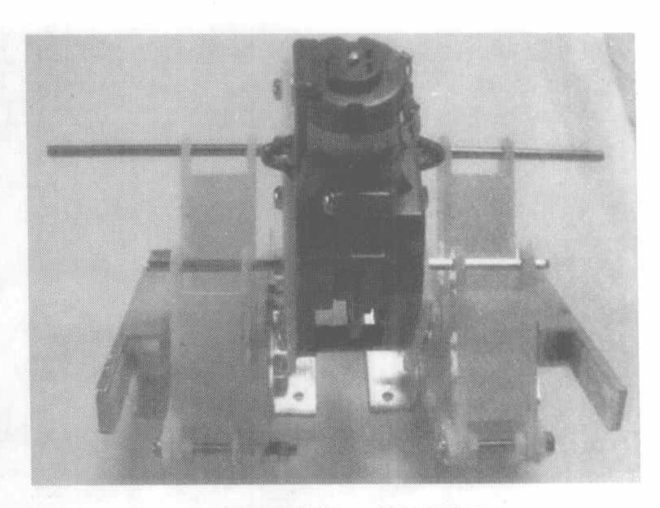


图1.55 确定脚底板的位置

像图1.56那样，把齿轮箱的轴穿过1只脚，电机的轴在前方，脚部有零件B、零件D的那面也要在前方。按同样方法，让齿轮箱的轴也穿过另一只脚。



(a)把一只脚插入齿轮箱的轴上



(b)把两只脚插入齿轮箱的轴

图1.56 组装脚和齿轮箱

如图1.57所示，把曲柄杆放到电机上，用M3螺丝（M3×12）从曲柄杆外侧的孔穿入零件F后用双螺母固定，螺母之间要拧紧。这样可以防止螺母松弛。但螺母和零件F之间要留一点点的空隙，要使曲柄杆和零件F都可以相互活动。

如图1.58所示，两脚都用M3螺丝（M3×12）穿过曲柄杆和零件F后，再用2个螺母固定。

图1.58中左右曲柄杆的安装方向是相反的。图1.59为曲柄杆的安装示意图。请确认一下自己安装的曲柄杆是否左右方向相反。

用M3螺丝（M3×12）、螺母把脚底板固定在脚面零件G上，如图1.60所示。

按图1.61安装电池箱，完成后的脚如图1.62所示。

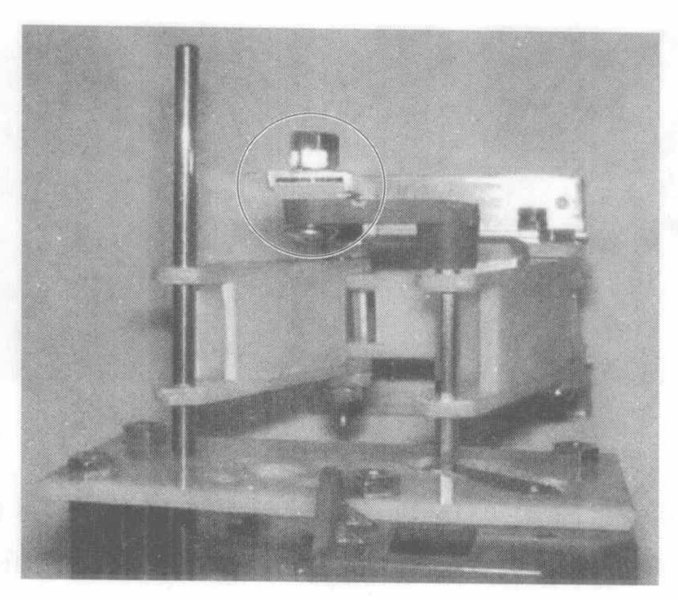


图1.57 用M3螺丝和2个螺母把曲柄杆固定到零件F上

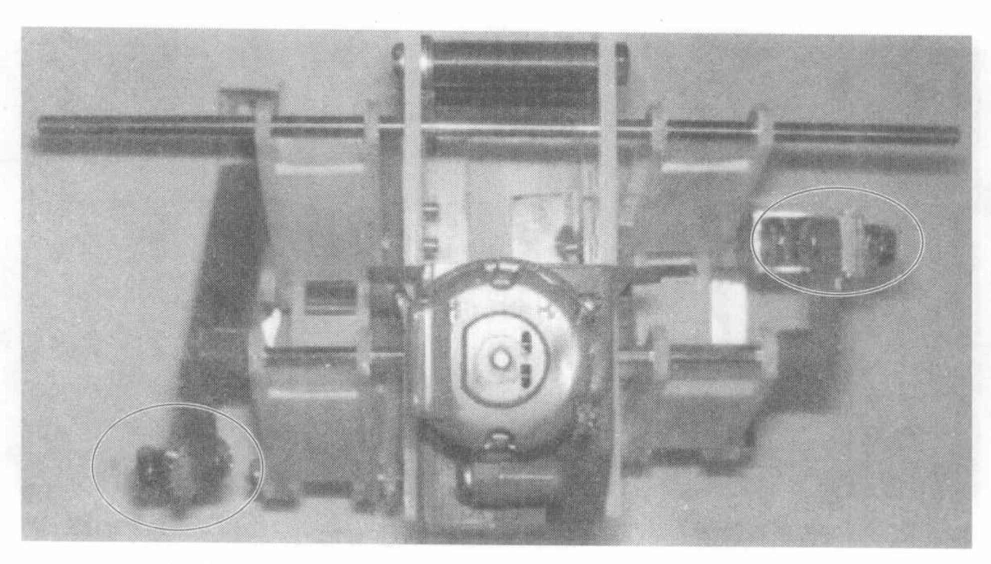


图1.58 两脚上的曲柄杆和零件F的M3螺丝、螺母的安装方法

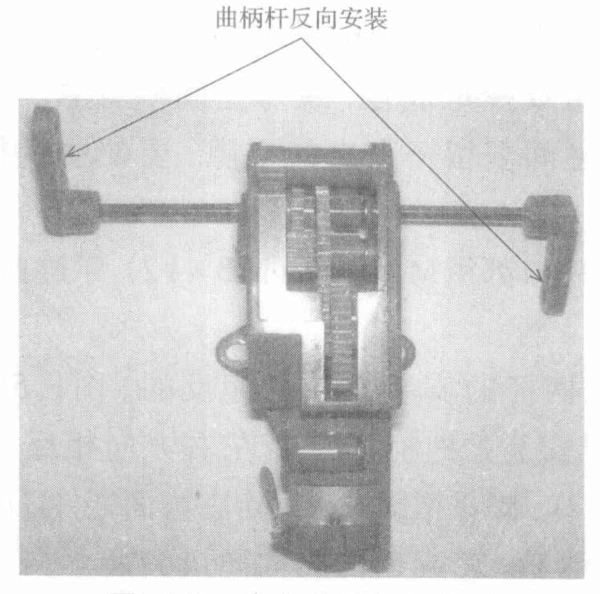


图1.59 确认曲柄杆的位置

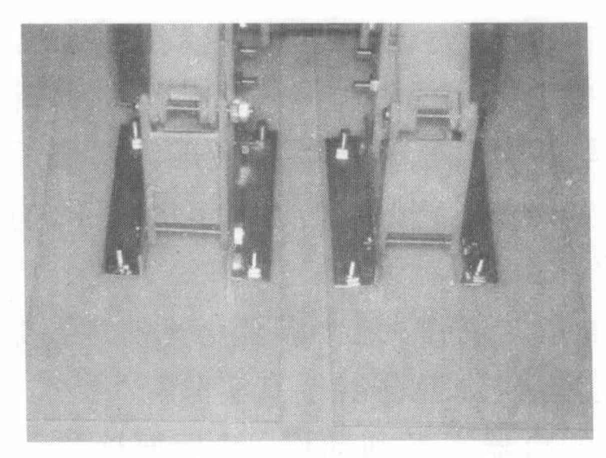


图1.60 固定脚面和脚底板

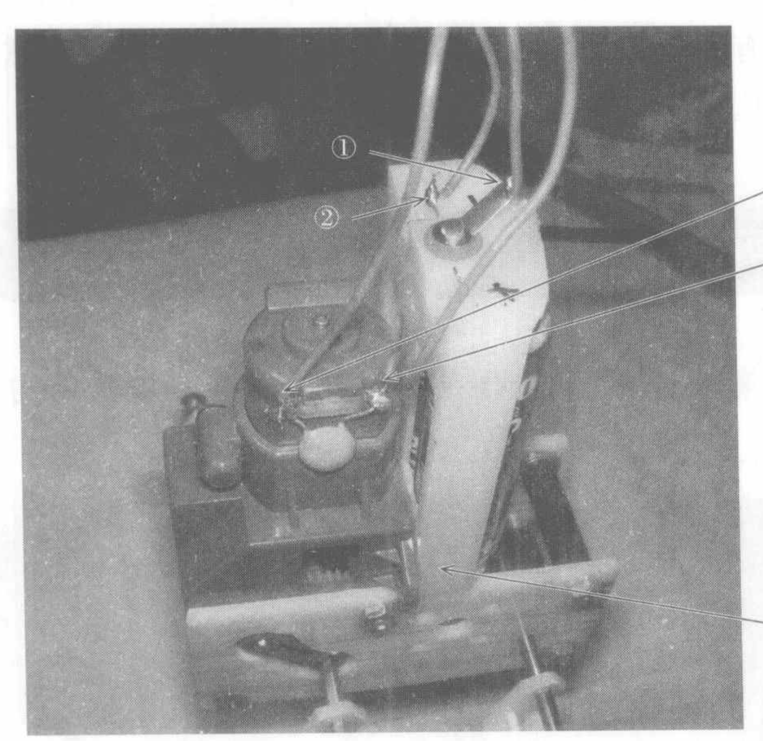
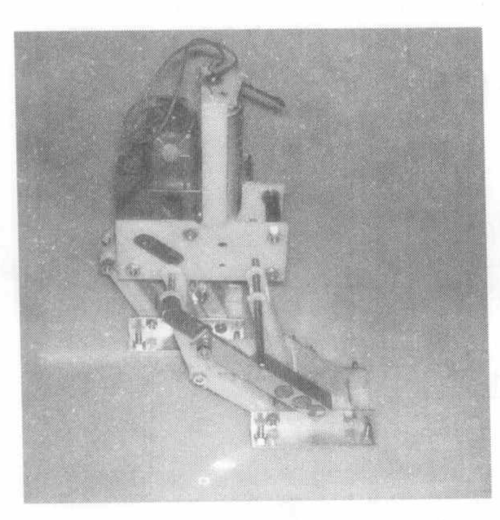
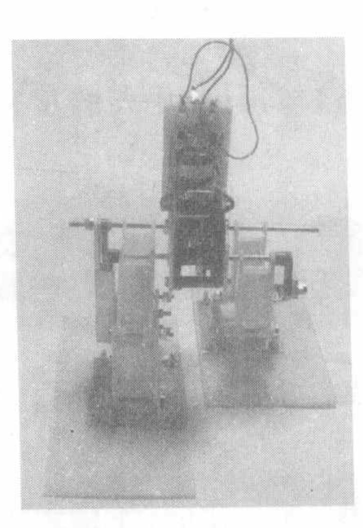


图1.61 安装电池箱



(a)从侧面看



(b)从前面看

图1.62 完成图

如果各零件制作正确，脚就能很好地组装出来。反之，就只有修改零件了；像图1.12的那种失败，就要把材料从截断开始重新制作了。有时失败的原因是因为不习惯，但经过几次失败后就会正确地加工出来的。可以想象出来，这个世界上那些多优秀的产品，正是很多的技术人员在开发阶段经过无数次失败后才成功的。

到此，完成了脚的基本制作。这个脚要一直使用到第5章。此后每章都会让双足步行机器人逐渐成长，并同时伴有实验。

为了能使完成后的机器人顺利动作，最后要确认一个要点：在脚的可动部，M3螺丝上的螺母不是太紧的，为了能够活动，应该留有少许的间隙。但随着多次的步行实验，螺母有可能会移动，间隙可能会消失。所以应注意这一点，不要把可动部位拧紧了。

1.4 脚擦地步行实验

把2节3号电池放入电池箱后打开开关看看：He，脚边擦着地边努力地向前迈步呢！如图1.63所示。

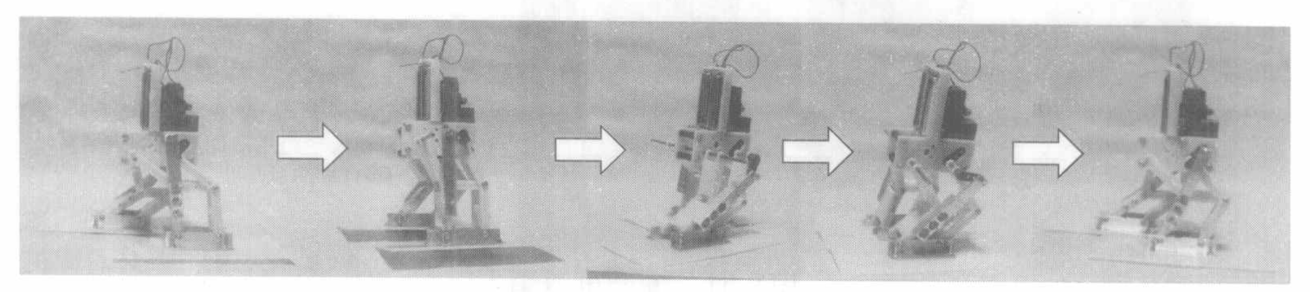


图1.63 第1章的双足步行机器人步行的样子

将图1.63与1.1节中人的步行分析结果比较一下：

分析1 步行是右脚向前迈出后，左脚再向前迈出的重复进行。
分析4 右脚迈向前方的同时，左脚留在后方。

以上2点，可以算是通过了。不过对于以下2点：

分析2 右脚向前迈步时，上提右脚。
分析3 右脚向前迈步时，只用左脚支撑身体。

这2点还不能通过呢。也许因为这个原因吧，步行时虽然左、右脚交替向前迈步的，但不是直线行走，而身体边左右转动，脚擦地向前步行。

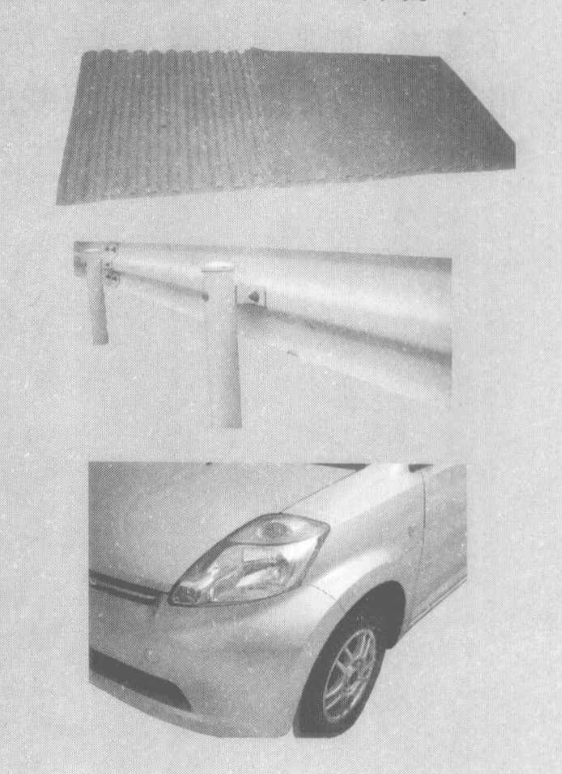
用1个电机和联杆结构，可以使脚互相交替着向前迈步，但是是脚擦地的步行。

下章中，将要使机器人成长为当脚向前迈步时，能把迈出的那只脚抬起来，用另一只脚支撑身体且能直线向前行走的双足步行机器人。

实验·理解

形状和强度

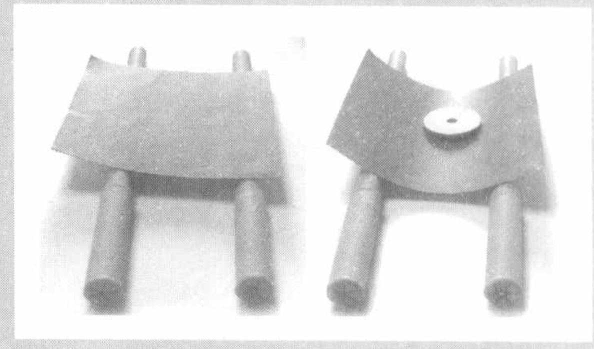
制作零件时，往往要求强度，这是很正常的，但如果一味地追求强度，无论做什么都使用厚铁板的话，做出的成品既笨又重。因此，来到世上的新产品为了达到既轻又有强度，其形状往往包含着很多窍门。



右边的照片是纸板，2张纸的中间参差不齐，使薄薄的纸也有了强度。

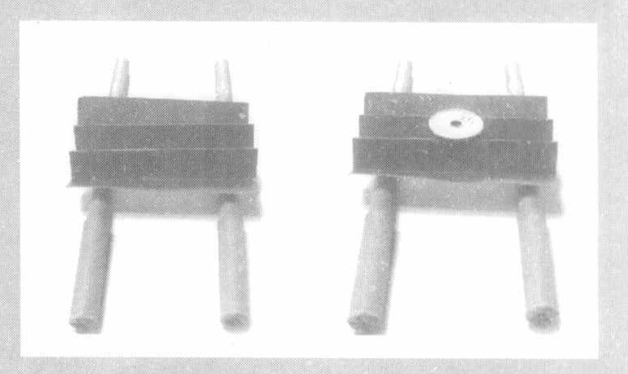
右边的照片是公路的护栏，成凹凸状，可以增加强度。

右边的照片是汽车的前部，做成曲线形状，这种形状也可以增加强度。



让我们用纸做个简单的实验吧。准备2张笔记用纸、2根铅笔和1枚硬币。

把硬币放到纸上时，纸和硬币一起下沉。这是因为一张纸支撑不住硬币的重量。

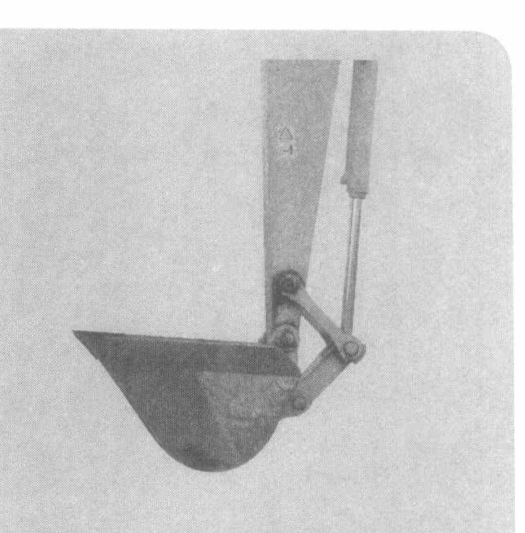


改变了形状后，再把硬币放在纸上，这次硬币不再下沉。这说明即使是相同的一张纸，在改变形状后也是可以增加强度的。

看看我们周围的东西，有很多是因为形状改变而增加了强度。

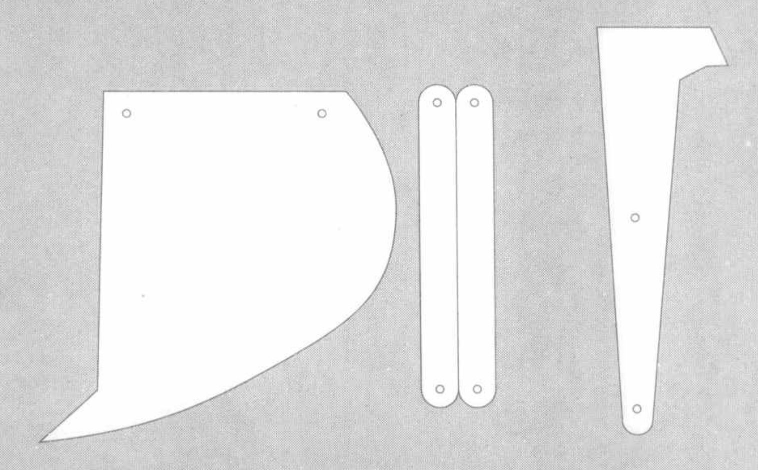
实验·理解

联杆结构



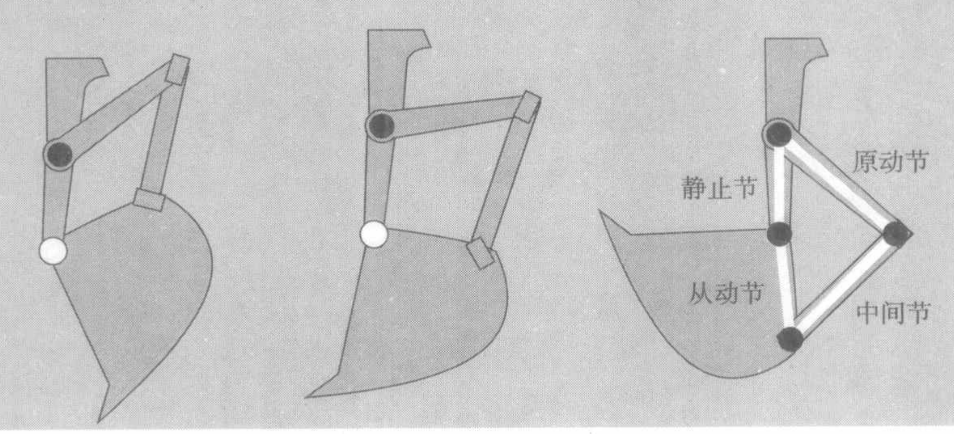
世界上有很多动作巧妙的机械。有用电子电路控制的动作复杂的机械，也有很多用联杆结构来完成动作的机械。比如在施工工地，掘土机的铲斗就是用联杆结构进行反复挖土的。这个反复挖土的动作究竟用怎样的联杆结构来完成呢？让我们做个模型实验吧。

把下面的图纸复印后贴在厚纸上，用剪刀剪下。圆孔是杠杆的连接部，又称为转动对偶。

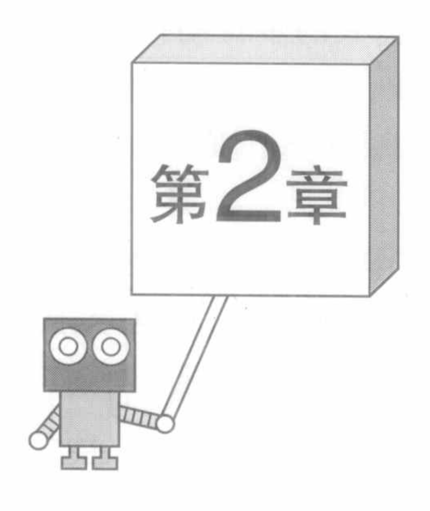


把它们用图钉连接起来并能自由转动。为了安全起见，在图钉的针尖钉入一次性筷子。

掘土机的静止节是作为臂杆固定的，由油压缸带动原动节，使从动节的铲斗按照要求动作。把模型中的静止节用图钉固定，活动原动节，观察一下铲斗的动作。







直线前进

——1个电机+杠杆——

在第1章中，我们制作了使用一个电机的双足步行机器人，但此机器人是双足擦着地步行的，没有达到图1.1中人步行动作的分析结果。还有，前进时不能直线行走，很不稳定。

在第2章中，将使机器人成长为向前迈脚，不是擦地的，而是向上抬起的，更接近于双足步行的机器人。为此，需重心移动。第2章将设法使重心移动简单化。另外，机器人将继续使用第1章中制作脚。

2.1 从脚擦地步行中脱离

第2章的目标是使机器人成长为当脚向前迈步时，能够使这只脚向上抬起后再向前步行。让我们再看一看在第1章中制作的机器人的步行动作。

比较一下图1.4中联杆结构的动作①～③。可以看出，动作①的脚是向上抬起的，但在第1章制作的机器人进行的动作①时，脚却是拖着地的，为什么呢？答案是重力的作用。

由于联杆结构的作用，应该抬起的脚却因重力的作用被吸引到地面上了，如图2.1所示。重力问题一直是双足步行机器人的难题之一。从这点上看，能灵活地对付重力，用双脚自由阔步行走的人类是多么了不起呀。

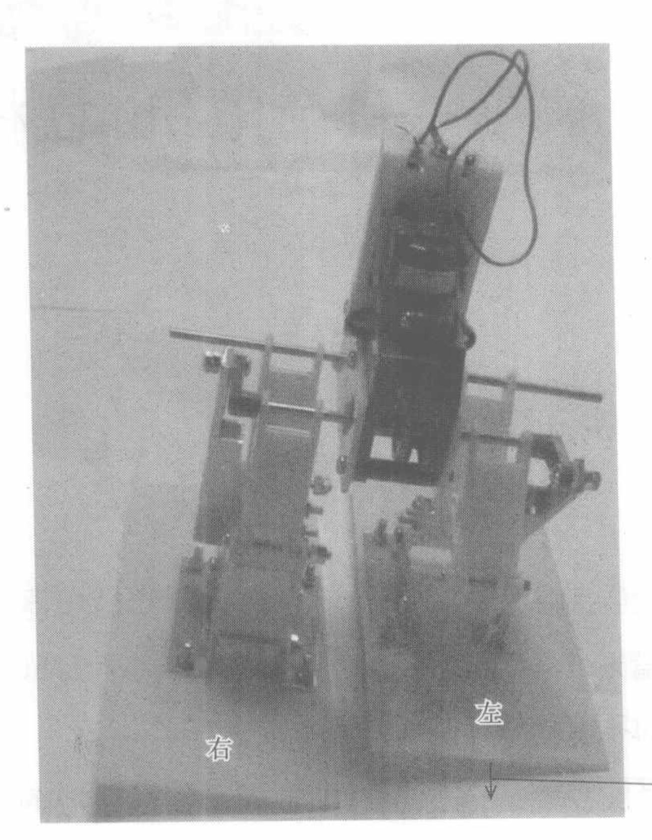


图2.1 左脚下降

为了排除重力的影响，用手把机器人向上提起，把脚动一动时，在右脚着地的状态下，左脚确确实实地抬起来了，如图2.2所示；松开手时，机器人受重力的影响又会两脚擦地行走，成了第1章中的双足步行机器人，如图2.3所示。在第2章中，机器人如果能做出把脚抬起的动作的话，不就可抬起脚向前迈步了吗？

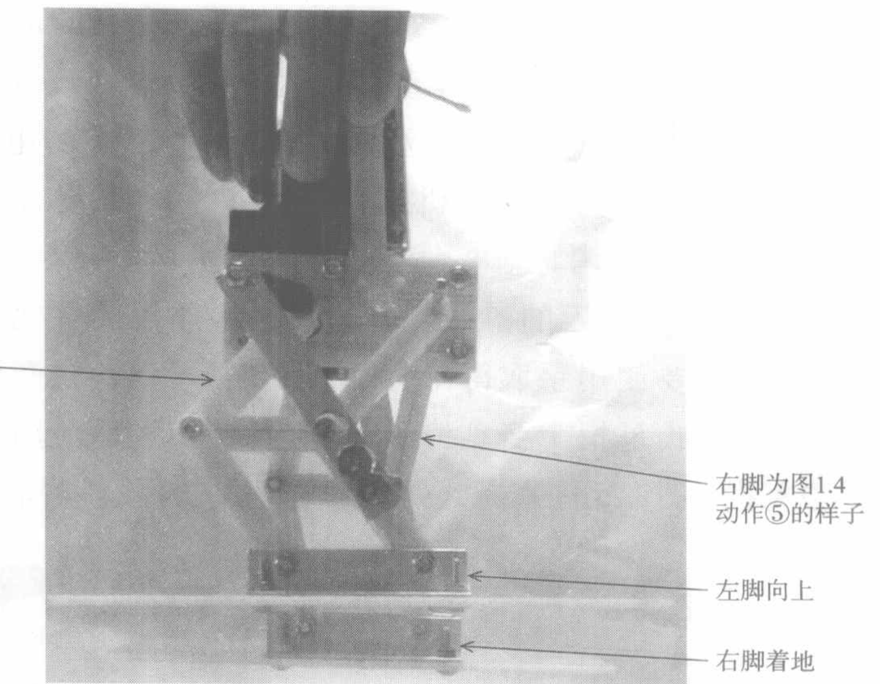


图2.2 用手把机器人抬起的样子

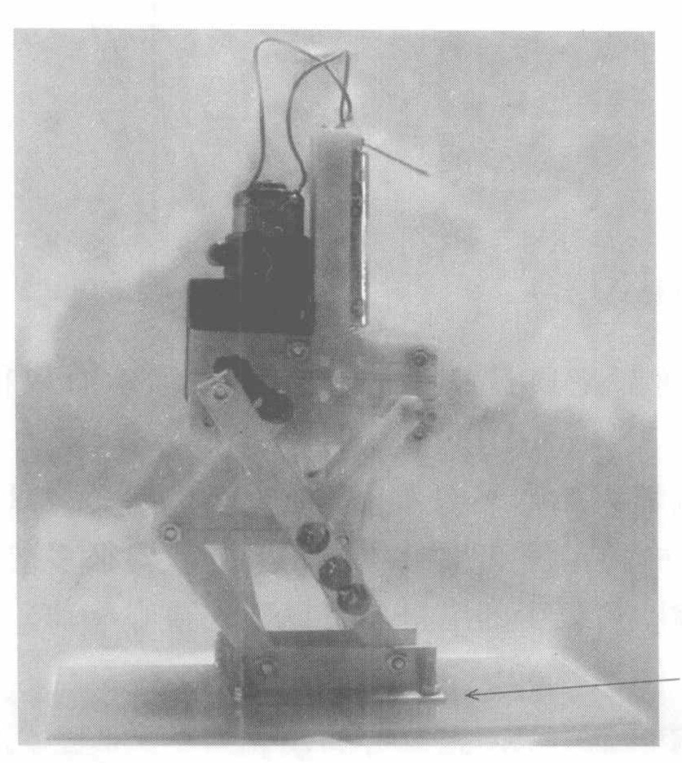


图2.3 通常的步行样子

2.2 用简单的方法移动重心

让我们考虑一下如何能让在第1章中制作的机器人边抬脚边向前迈步。

在这里还是让我们参考一下双足步行的老前辈——人的动作吧。实际上，把单只脚抬起步行的状态只是连续步行动作中的一部分，是整个身体把重力和惯性巧妙地控制住的。要实现这种状态，需要很多的电机和复杂的控制结构。本书的目的是以少量的电机制作双足步行机器人，所以把一只脚抬起可以作为单独的动作去考虑。

做一下把右脚抬起后的静止动作。一定是摇摇晃晃着达到平衡后站住的。静止站立时不要使用手取得平衡，这个姿势可用静止画面表示。

图2.4的上提式是把上身往左脚上移动的同时，抬起的右脚稍微靠向内侧后取得平衡的，图2.5的上提式是把上身往左侧倾斜后取得平衡的。

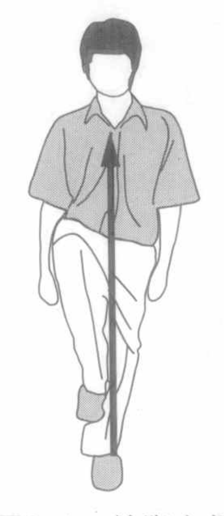


图2.4 单脚上提式1



图2.5 单脚上提式2

可以看出：两种式样都是通过把重心往左脚上移动而取得身体平衡的。

那么，也让本书的机器人抬起一只脚时，把重心移到另一只脚上。关于重心移动的方法，图2.4中的足脖和腰处需要活动，需要很多的电机；而图2.5中，只需要使身体倾斜，用很少的电机就可以实现重心移动。

方针 抬起一只脚时，使身体倾斜，把重心移动到另一只脚上，进行双足步行。

2.2.1 在双脚上增加杠杆使重心移动

使身体倾斜的方法有很多，这里考虑以增加最少的零件使身体倾斜的方法。

在不增加电机的情况下，增加新的动作如何？对，用杠杆。只在两脚上分别增加一根杠杆就可实现重心移动。

如图2.6所示，在抬起左脚的同时，使身体向右倾斜，重心移动似乎成为可能。

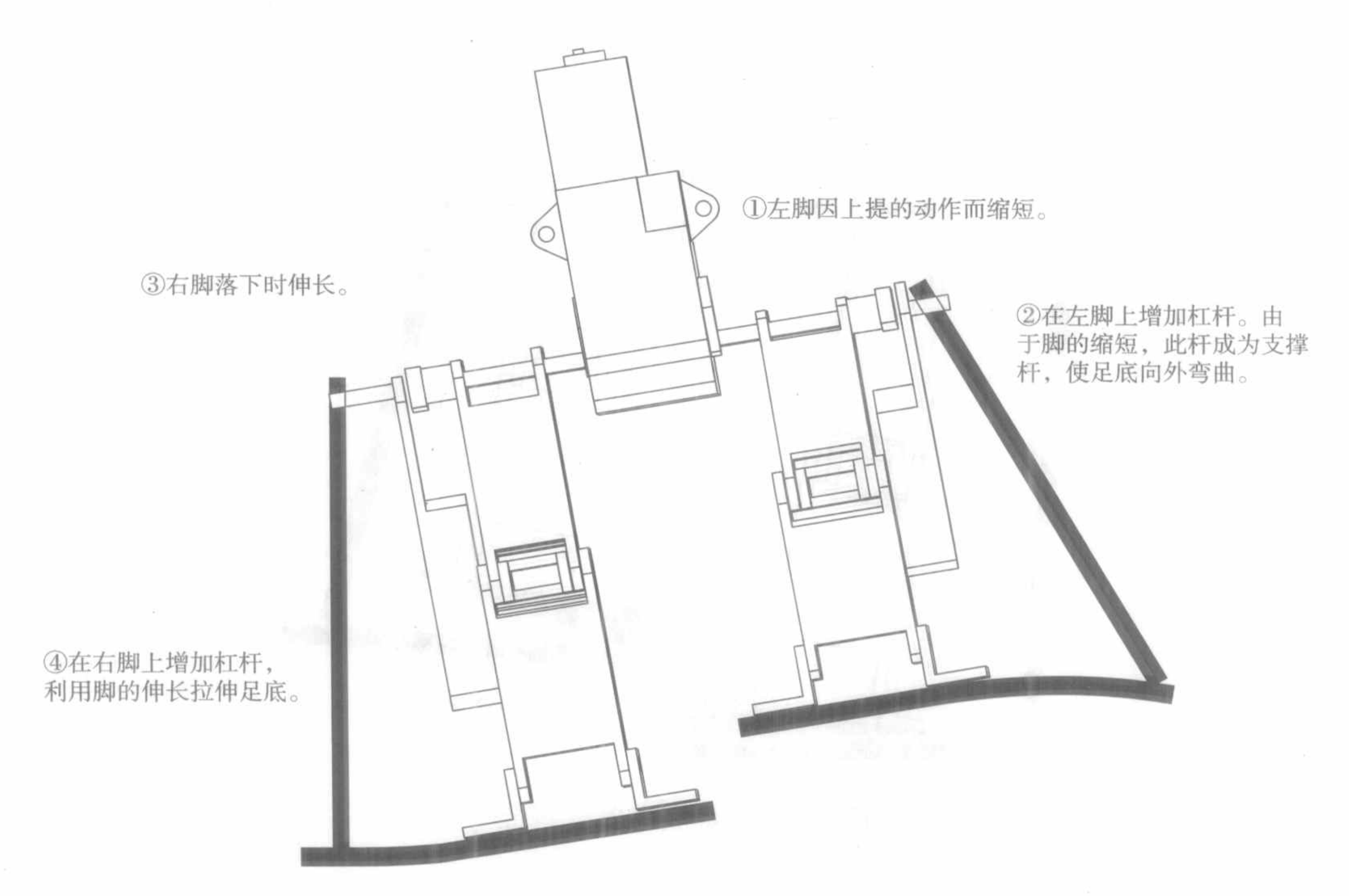


图2.6 增加杠杆时脚的动作

2.2.2 设法进行可靠的重心移动

用图2.6中增加杠杆的方法，似乎可以使身体倾斜，但脚的结构又成了问题：因为身体每次倾斜时，脚都要弯曲。所以，要想办法进行更可靠的重心移动。

在脚上安装斜台*，在脚不弯曲的情况下，身体也可以倾斜。如图2.7所示，即使脚底板不弯曲，由于增加的杠杆的作用，在与抬脚方向相反的方向上，可以使身体倾斜。斜台和增加的杠杆可以用ABS材料制作。斜台和脚底板之间可以用铰链连接。

*关于这种脚的结构，株式会社cube已经申请了专利（专利2002—299481，2002年10月11日，申请种类为普通），是禁止作为商业目的使用的。

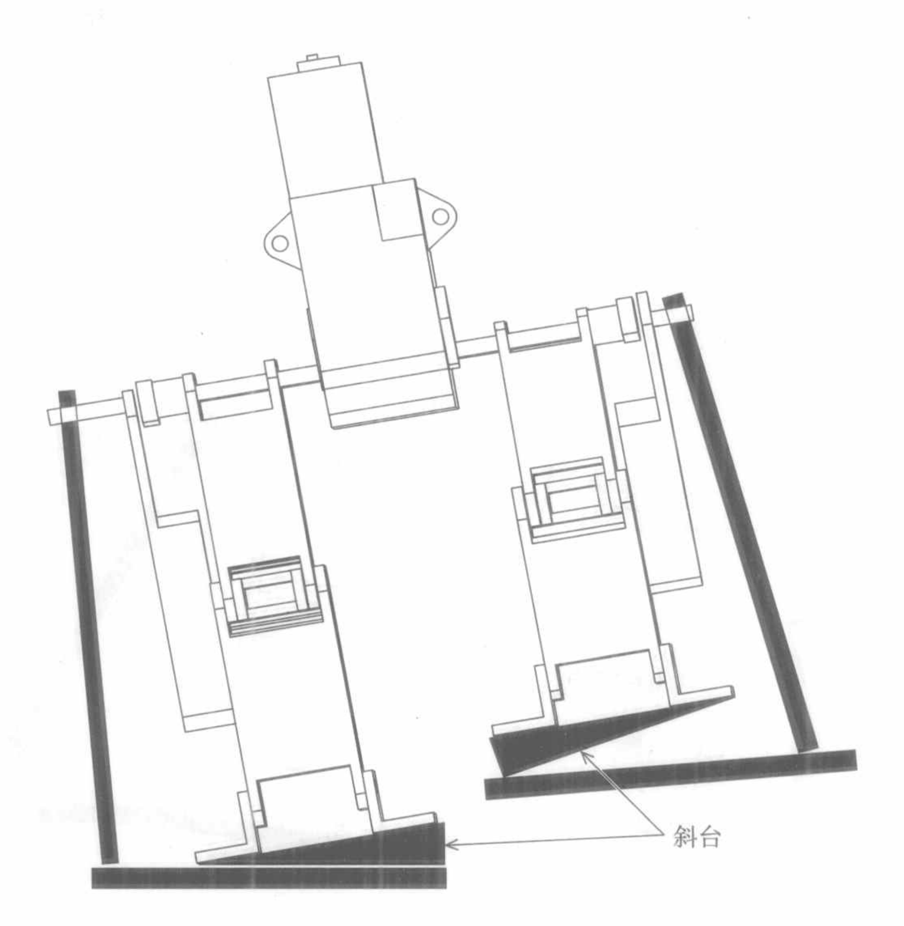


图2.7 在足底上安装斜台

2.3 制作增加的杠杆

第2章中在脚上增加的材料见表2.1。

表2.1 第2章中在脚上增加的材料

品 名	规 格	数量	购买地点	单价/日元
铰链	长度38mm以下的	2	商店	358
风筝线	30m/卷	1	商店	157
粘接剂	速效粘接剂	1	商店	525

开始制作。剪切出需要的材料，按照图2.8的尺寸和图2.9的配置，在剩余的ABS板上划线。此时的制作不需要像第1章制作时的高精度，可以忽略塑料切断刀的厚度，直接在划线上切断。从ABS板上切出的各个材料如图2.10所示。

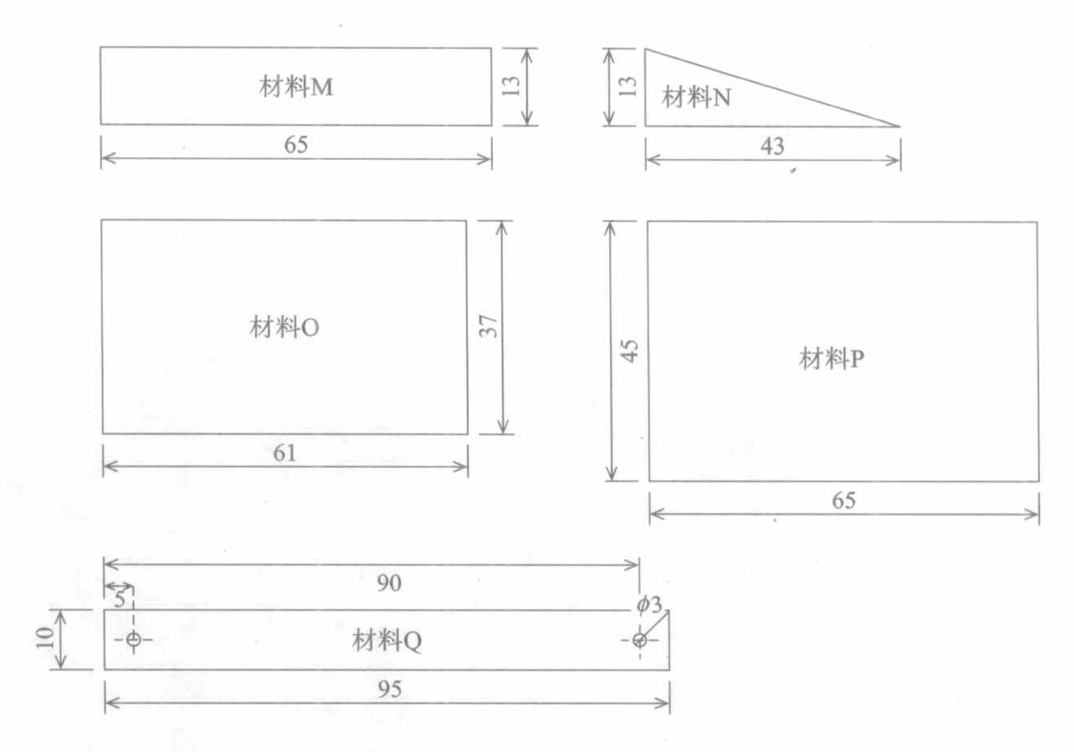


图2.8 材料M、N、O、P、Q的尺寸

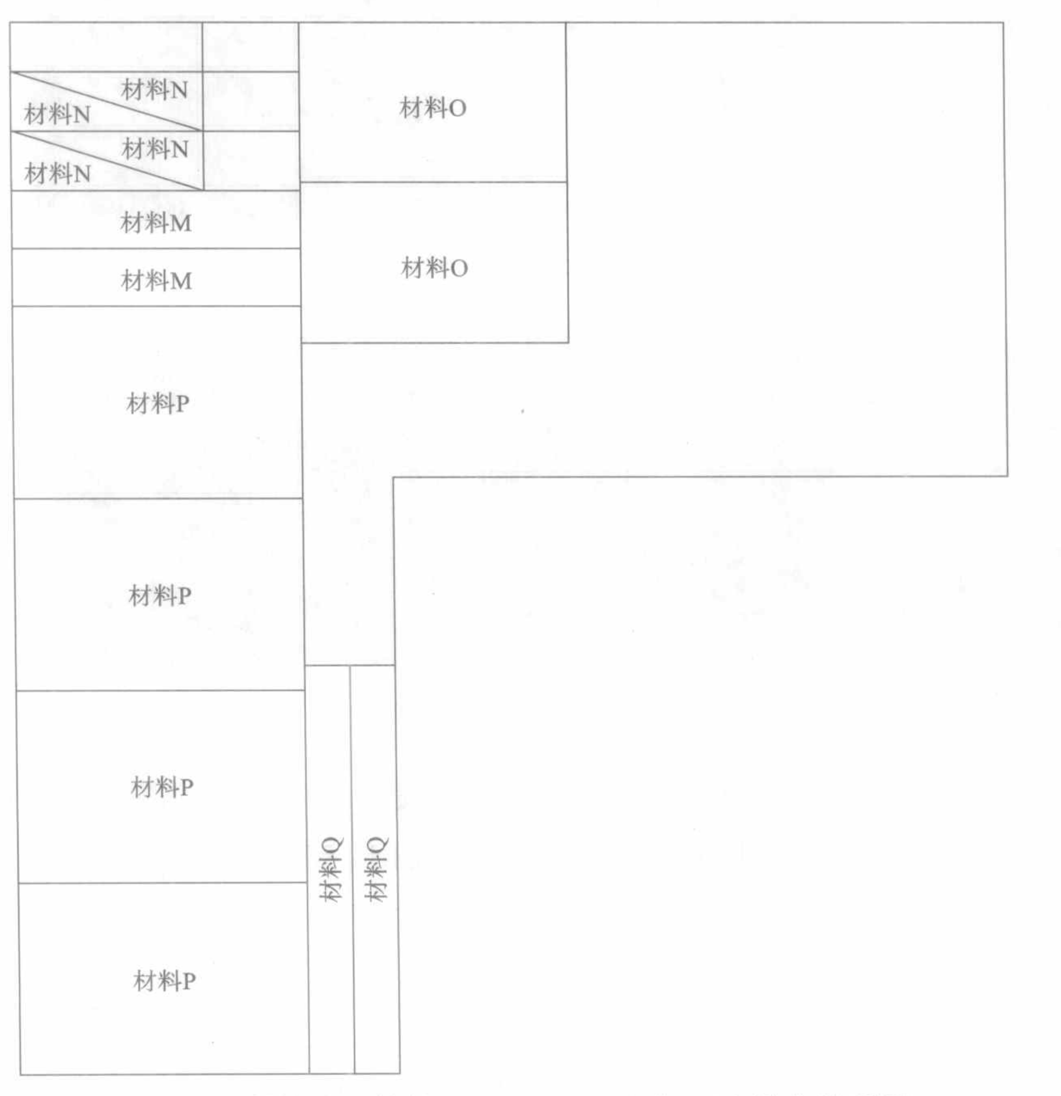


图2.9 材料M、N、O、P、Q在ABS板上的配置

在材料Q上打孔。因为Q材料较大，可以先把材料切断后再打孔。打孔时，先用打孔机在打孔位置打出记号，再用电钻打孔，操作时要注意安全。

把材料M和N用粘接剂粘接到材料O上，如图2.11所示。再把材料P放到粘接后的M和N上，用ABS粘接剂粘接，如图2.12所示。要做2只脚的。

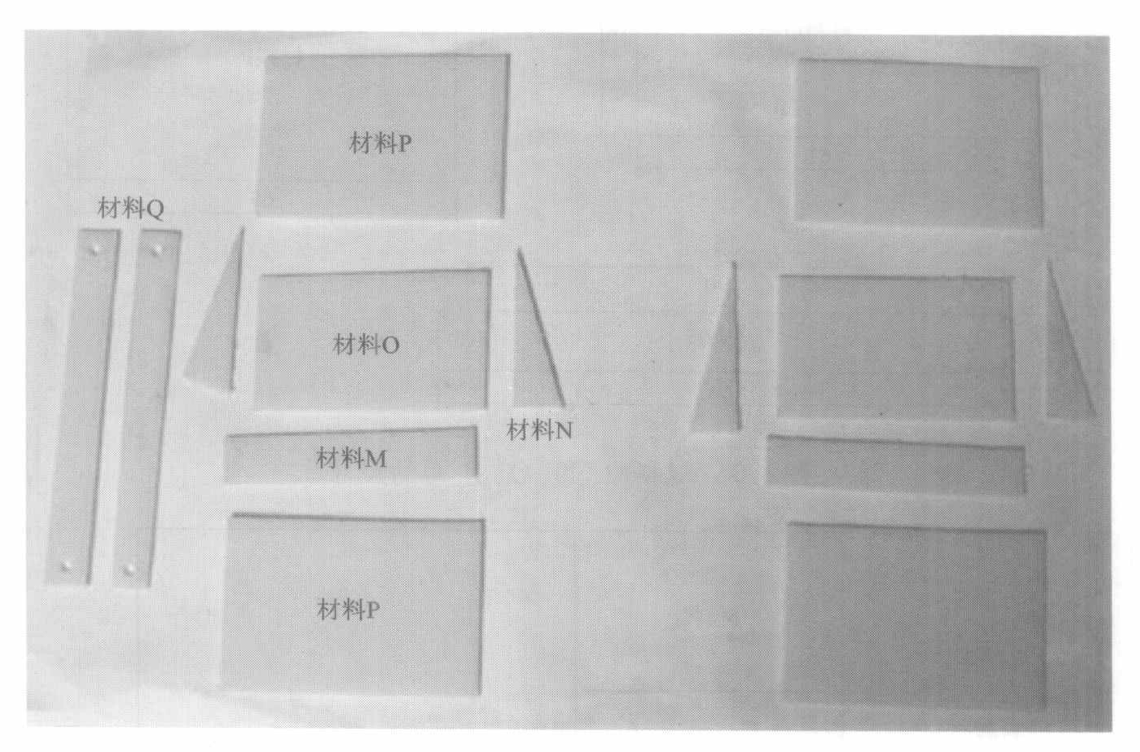


图2.10　从ABS板上切出的各个材料

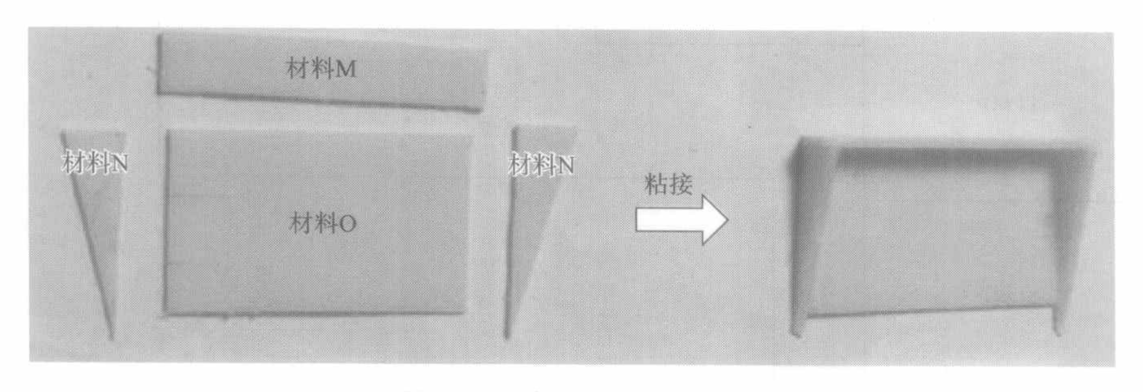


图2.11　粘接材料O、M、N

在刚才粘接制作的材料O上粘接铰链，如图2.13所示。粘接剂要用使金属和ABS都能粘接的，如图1.10所示。在粘接前，要确认铰链能平滑地活动。

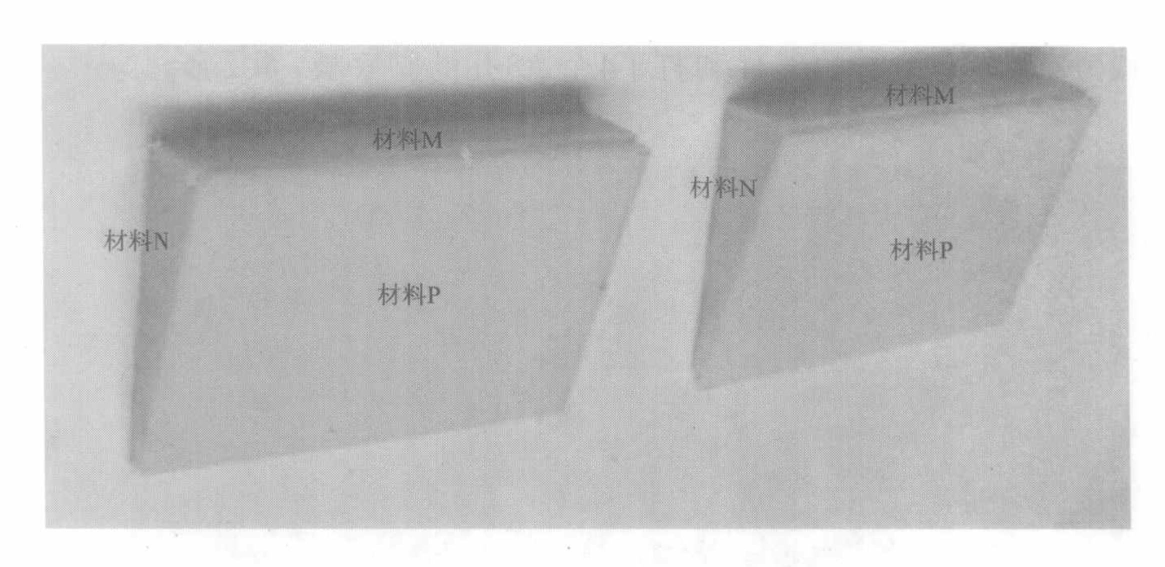


图2.12 把材料P放到材料M和N上粘接

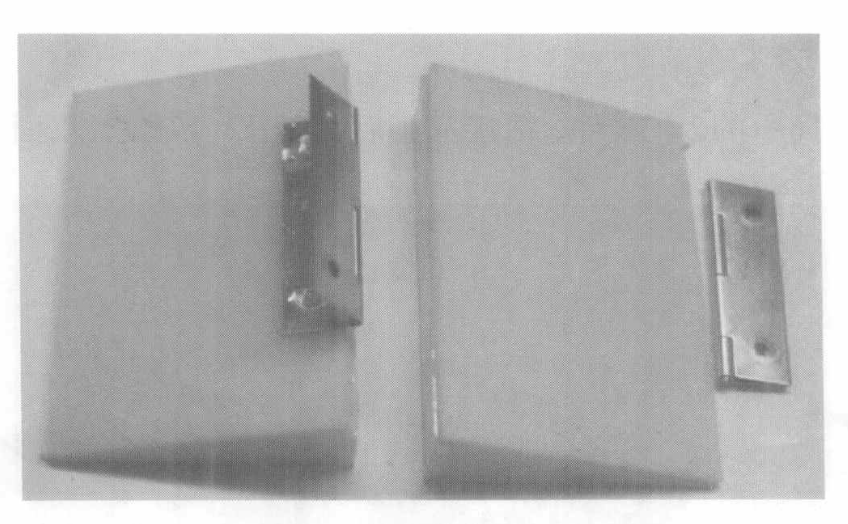


图2.13 粘接铰链

还剩有2块材料P，现在把材料P安装在脚面上。按图2.14所示在材料P上画出脚面上孔的位置，打出4个$\phi 3$的孔。打孔时要把材料固定结实，注意安全。

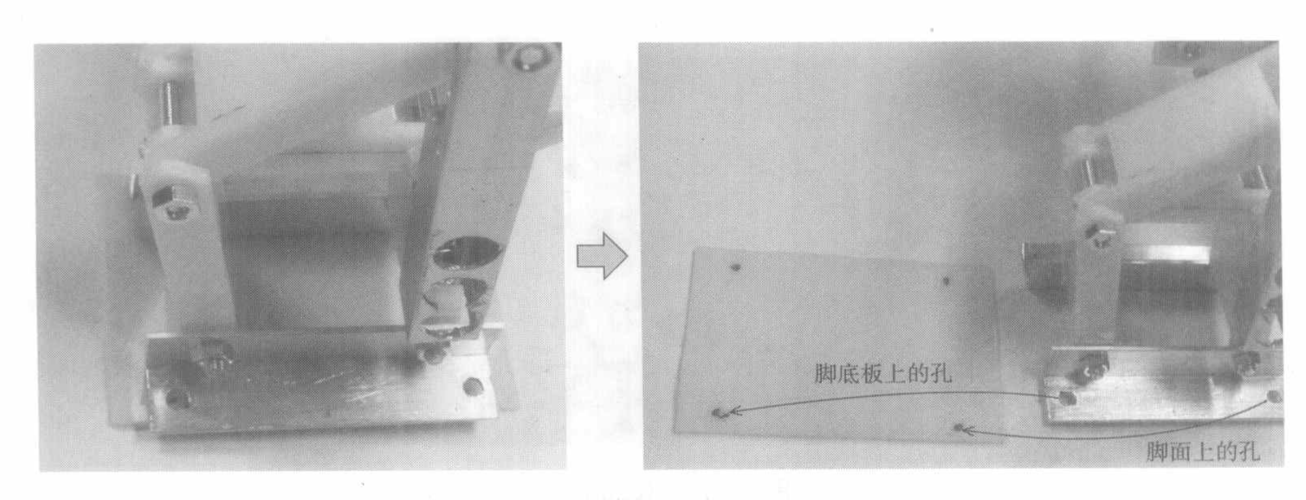


图2.14 把脚面和脚底板的孔对准

图2.15是装有铰链的零件和打了4个ϕ3孔的脚底板，共2套。

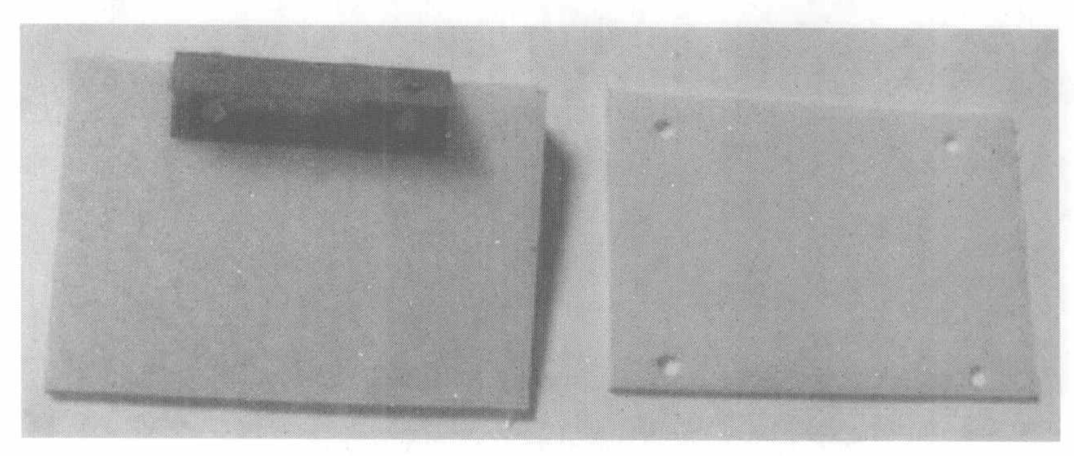


图2.15 铰链和打了孔的脚底板

粘接图2.16中的2个零件。粘接完了后，按图2.17贴上双面胶。

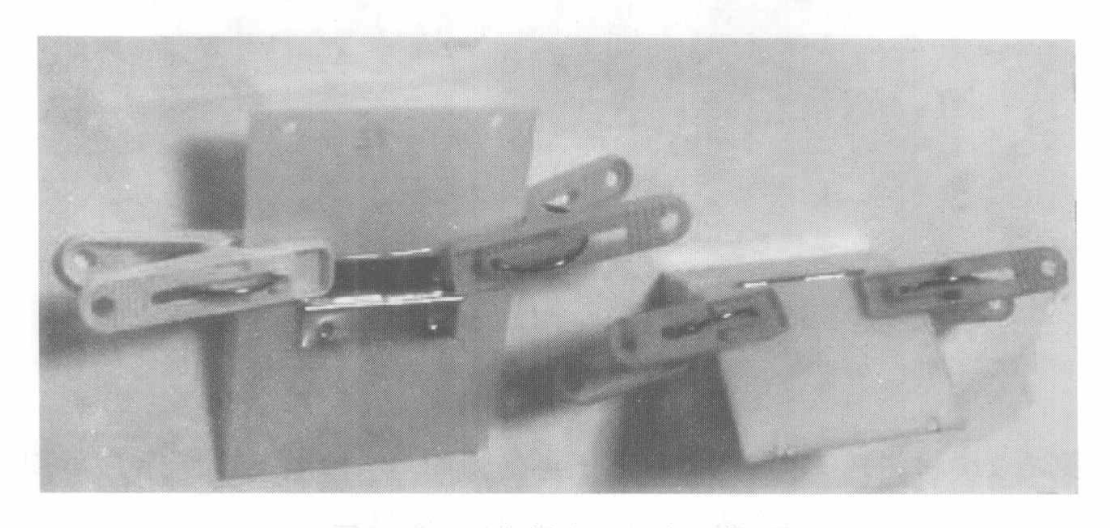


图2.16 用塑料夹子固定后粘接

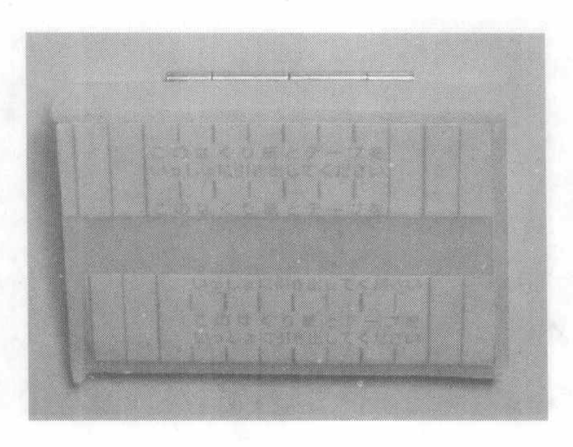


图2.17 双面胶带

把在第1章中制作的脚底板拆下来，如图2.18所示。用双面胶把上述零件粘接到脚底板上，再在脚底板上增加一个$\phi 3$的孔。

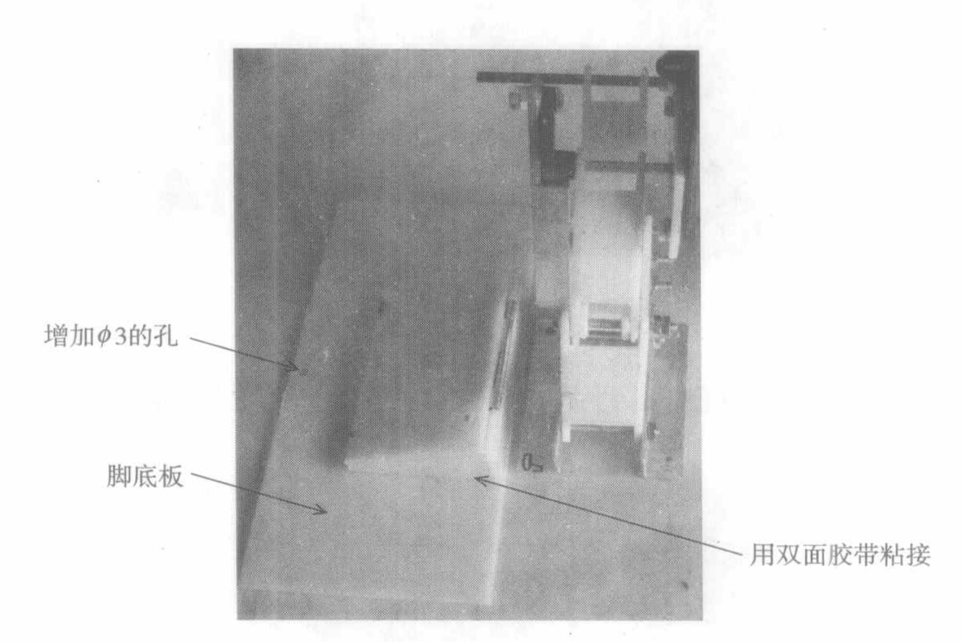


图2.18 粘接到脚底板上

把刚才制作的零件用M3螺丝和螺母安装到脚面上，如图2.19所示；另一只脚比较难安装，如图2.20所示。安装时，不要旋转螺丝而要旋转螺母，实在安装不上的话最好把曲柄杆先拆卸下来。

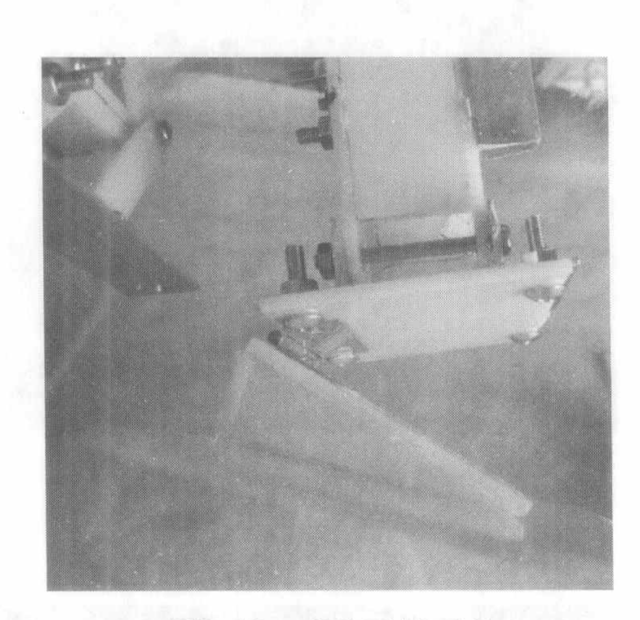


图2.19 安装到脚面上

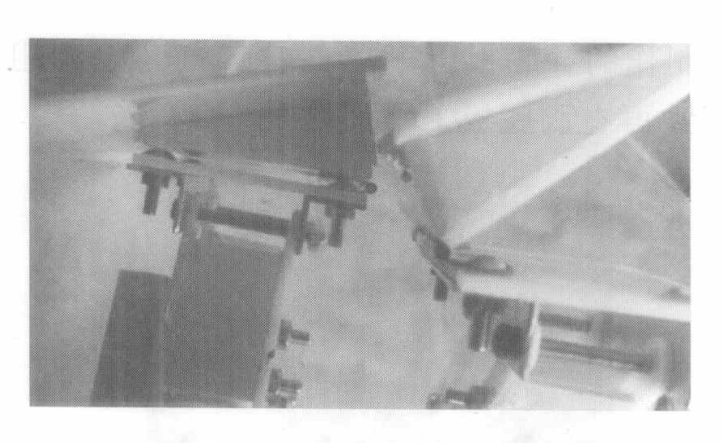


图2.20 难固定的位置

按图2.21所示安装杠杆。到此，第2章的双足步行机器人制作完毕。

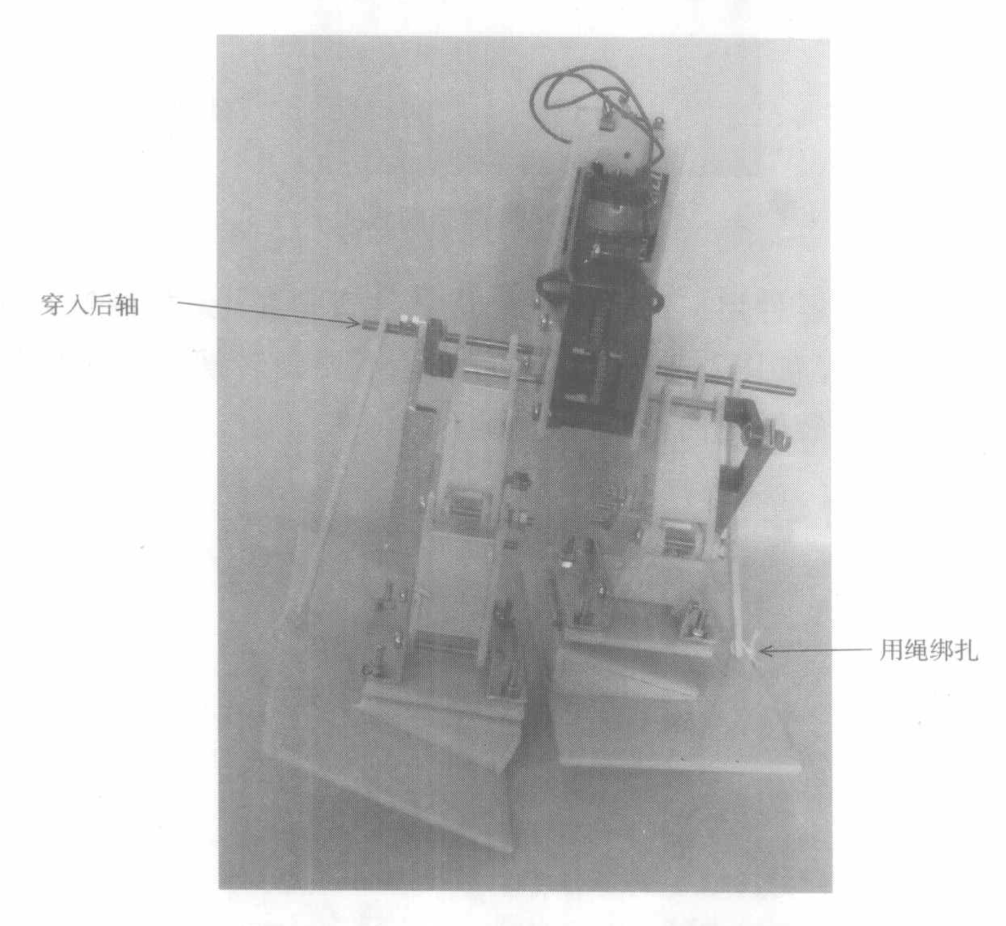


图2.21 安装杠杆后完成机器人的组装

2.4 直线前进的双足步行实验

快做实验吧。把制作出的双足步行机器人放在水平面上，通上电源看看。

如图2.22所示，是身体左右倾斜着前进的吗？一定是切切实实地直线前进吧。

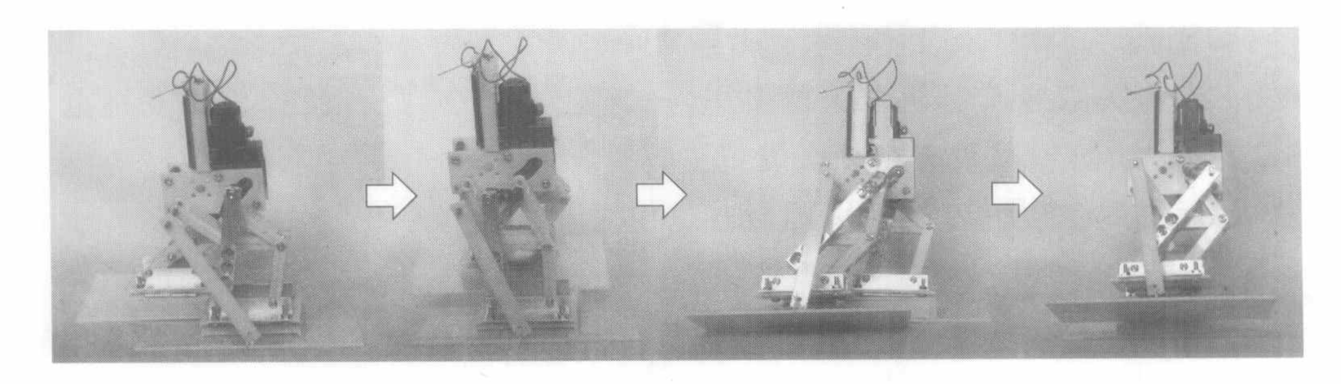


图2.22 第2章的双足步行机器人步行的样子

由于把重心移动到了地面上的那一只脚上，是把脚上提后向前迈步的，因此第1章中出现的问题：

分析2 右脚向前迈步时，上提右脚。
分析3 右脚向前迈步时，只用左脚支撑身体。

得到了解决。

第1章中的双足步行机器人虽然也是向前方步行的，却不是直线前进，这是因为向前迈出的脚没有抬起来。而第2章中制作的双足步行机器人，由于把向前迈出的脚抬起来了，所以能够直线前进。另外，从“实验·理解：重心”中可以知道在静止状态下，要使抬起一只脚的机器人不倒下去，必须把身体的重心落到另一只脚上（其正下方应该有支撑）。

当把重心移动到着地的那只脚上，使向前迈出的脚悬空时，双足步行便成了直线。

由于脚的旁边增加了杠杆，只用1个电机就实现了直线前进的双足步行，但此时脚的外观却不太雅观。

在下述的第3章中，将把杠杆卸下来、增加电机，用与第2章不同的方法，使机器人成长为一边把重心移到一只脚上，一边步行的双足步行机器人。

实验·理解

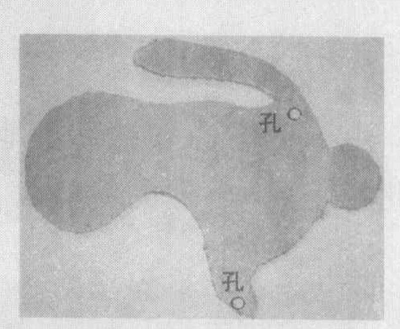
重 心

在有关双足步行机器人的书里，一定会提到重力及重心。重心就是重量的中心，但想过重心在什么位置了吗？

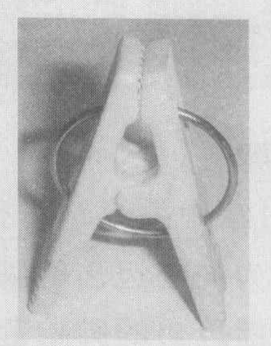
通过重心的实验，就可以更详细地知道本书的机器人和重心的关系了。

实验：求出纸板人形的重心，用塑料夹子立起来。

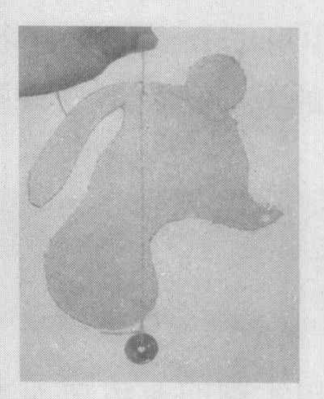
① 用剪刀在纸板上剪出一纸板人形，形状越复杂越有意思。在纸板人形的适当部位打2个孔，以穿入线绳。



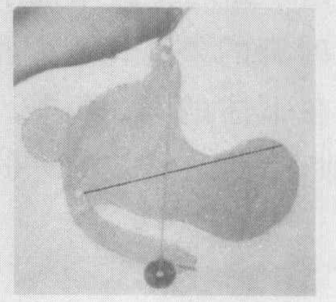
② 准备1个塑料夹子。如果在夹子用手捏住的部位是圆形，则用剪钳剪平，让它能立在桌面上。再准备20cm左右的线（生线或风筝线），在线的一端栓上5日元的硬币。



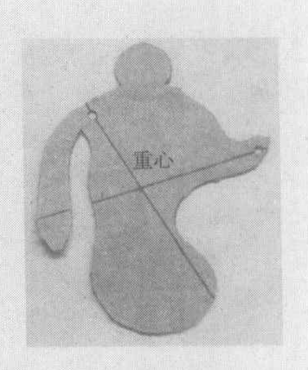
③ 把线栓入纸板人形的一个孔，让纸板人形下垂，然后用记号笔画出绳子的直线位置。



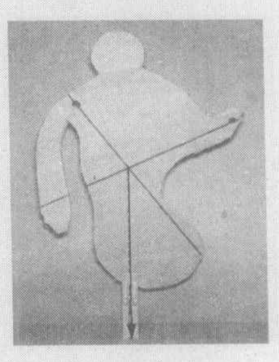
④ 把线栓入纸板人形的另一孔内，让纸板人下垂，再用记号笔画出绳子的直线位置。



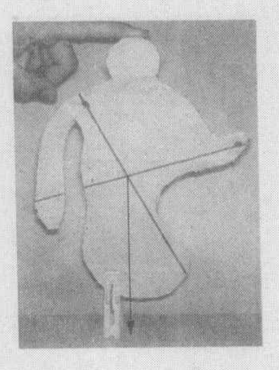
⑤ 2根线的交点，就是纸板人形的重心。

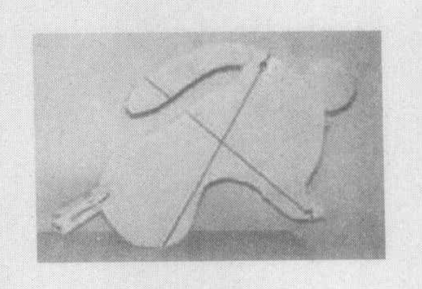


⑥ 从重心位置垂直向下画出箭头，用塑料夹子沿箭头的直线夹住，则可把纸板人立起来。

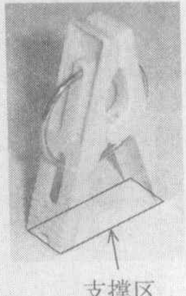


⑦ 如果塑料夹子所夹的位置不在箭头线上，纸板人就要倒下。





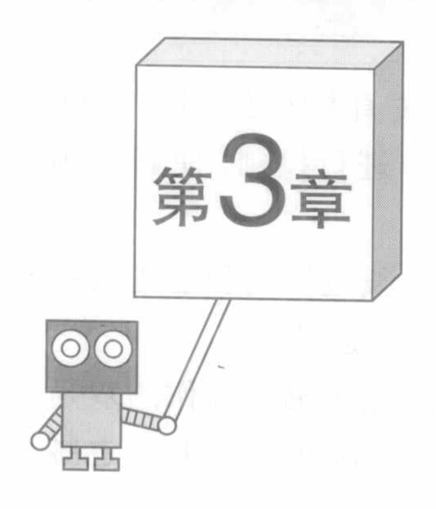
用线画出的部分是塑料夹子与地面相接触的部分，通常叫做“支撑区”。把上述实验反复进行几次后，可以知道：


支撑区

在纸板人形重心的正下方，如果有塑料夹子的“支撑区”，则纸板人能够立起来。

⑥从重心垂直向下的箭头在塑料夹子的“支撑区”内；而⑦因不在支撑区内，所以要倒下来。

本书的双足步行机器人也同样，要使机器人步行时不倒下去，必须在机器人重心的正下方有与地面相接触的脚（支撑区）。此种步行方式称为静步行。当机器人成为高机能的双足步行机器人时，在机器人重心的正下方即使没有着地的脚（支撑区），步行时也不会倒下，请参考第6章。



直线前进、直线后退

到第2章，机器人已经成长为能直线前进的双足步行机器人了。其增加了杠杆，却牺牲了外观。第3章中，将把杠杆拆下来，改用其他方法，使其成为边移动重心边步行的机器人。那时，机器人不光能前进，也可以后退，还可以用遥控器进行控制。

第3章中将增加一个电机和齿轮箱，组成重心移动的结构。让我们亲自制作它、遥控它，使它进行直线前进和后退的双足步行机器人。另外，和第2章一样，仍使用第1章中制作的脚。

3.1 前进、后退的遥控

3.1.1 用遥控控制电机的转动方向

到第2章为止，都是把装在机器人身上的电源开关直接打到ON、OFF位置进行行走和停止的。第3章中，将对机器人的动作进行控制，使其成为能遥控前进、后退和停止的双足步行机器人。

遥控方法有无线方式和有线方式，无线方式中有无线电控制和红外线控制等。本章中将采用操作简单的有线方式6P扳扭开关进行遥控。

对前进和后退的遥控，就是对正转和反转的控制。在本书中制作的双足步行机器人的步行用原动节的转动方向，也就是电机的转动方向来决定脚的动作。如图3.1所示，从动作①开始，电机是正转的，动作后变成动作②的样子；③是电机反转时脚的动作。

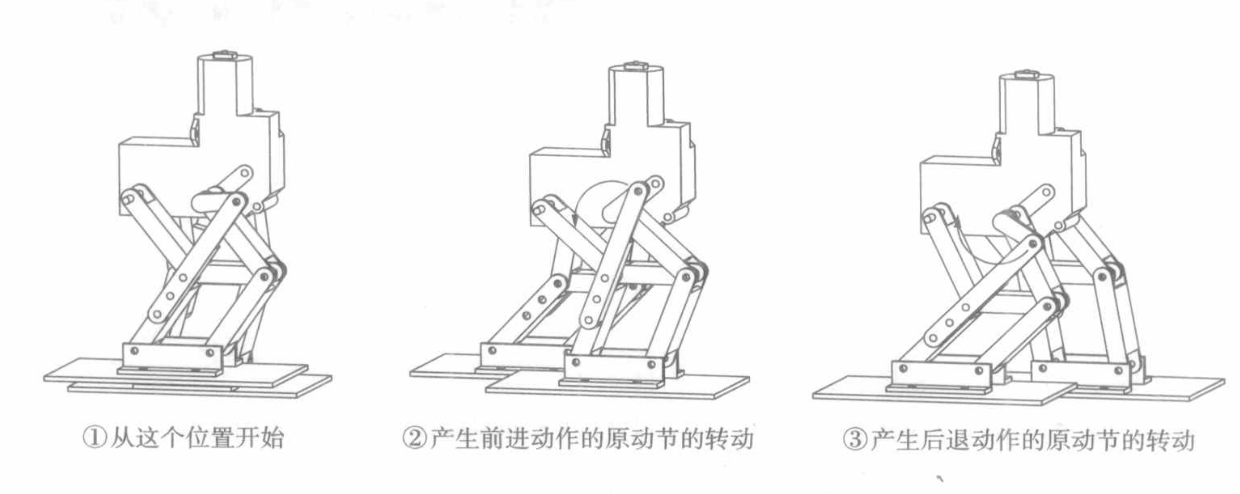


图3.1 电机的转动（原动节的转动）和脚的动作

如图3.2所示，当调换电池的“+”极和“−”极时，电机的转动方向就相反。

如果每次变换前进和后退都要调换电池的“+”极和“−”极，是很麻烦的。利用6P扳扭开关可以切换“+”和“−”极，如图3.3所示。

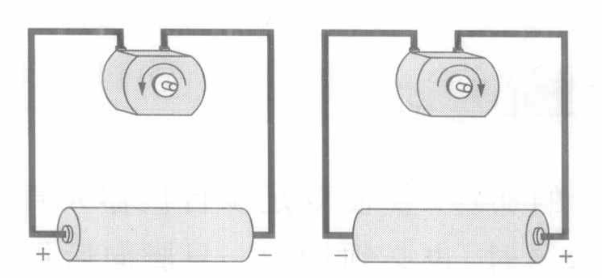


图3.2 电池的“+”和“−”相反时，电机的转动方向就相反

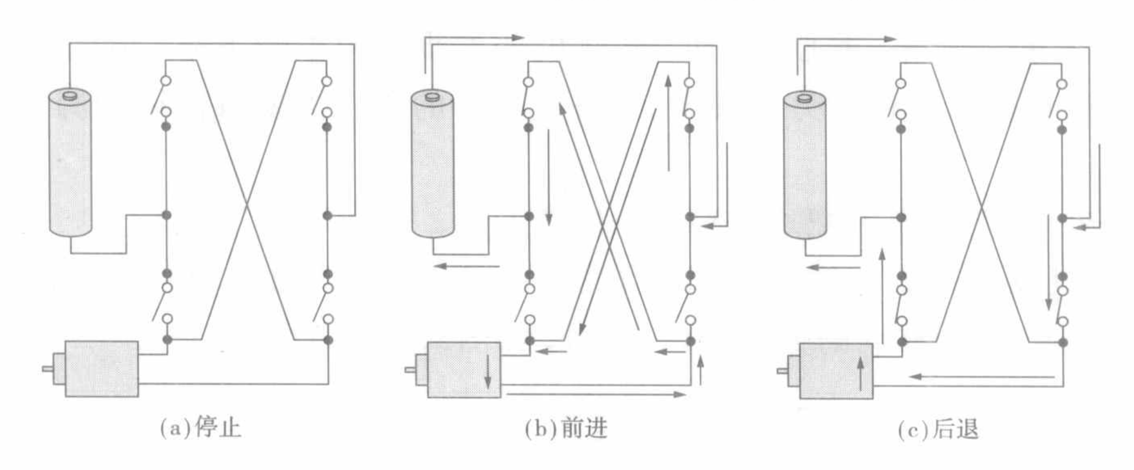


图3.3 用6P开关切换“+”和“−”极

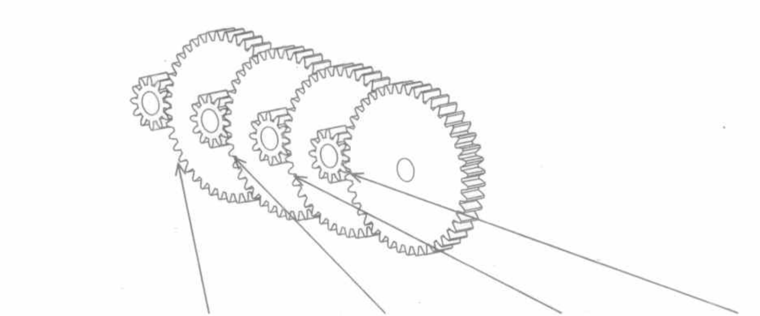
3.1.2 曲柄齿轮箱的减速比

如果步行动作过快，遥控就很困难，所以要把步行速度降低到与人的步行相接近。

在第1章和第2章中使用的曲柄齿轮箱的减速比为441∶1，在可供选择的4种减速比中是比较小的，所以转动速度较快。

在脚的动作上，可以按照以前的减速比。但对于3.1.3节中将要增加的齿轮箱来说，如果不增大减速比、降低速度的话，其动作就快于人的速度。

因此，组装齿轮箱时，要用最大的减速比5402∶1进行组装，如图3.4所示。



总减速比 $\frac{1}{36}\times\frac{12}{42}\times\frac{12}{42}\times\frac{12}{42}\times\frac{12}{42}=\frac{20\,736}{112\,021\,056}=\frac{1}{5402.25}$

图3.4 4速曲柄齿轮箱的减速比约为5402∶1

3.1.3 后退时的重心移动

像在第2章中实验的那样，要使双足步行机器人直线向前步行，必须抬起一只脚向前迈步；后退时，也必须抬起一只脚向后迈步，两种情况都需要抬脚这个动作。在本书中制作的双足步行机器人的步行方式为静步行，由第2章“实验·理解：重心”可知，要使机器人步行时不倒下来，抬起一只脚时必须把身体重心移到另一只脚上，并且重心的正下方要有落地的脚（支撑区）。

那么，我们就规定把重心移到一只脚上吧。

在2只脚上都安装重心移动的结构，电机至少需要2个，腰部只需要1个电机。这样，重心移动的方法可以有3种，如图3.5～3.7所示。

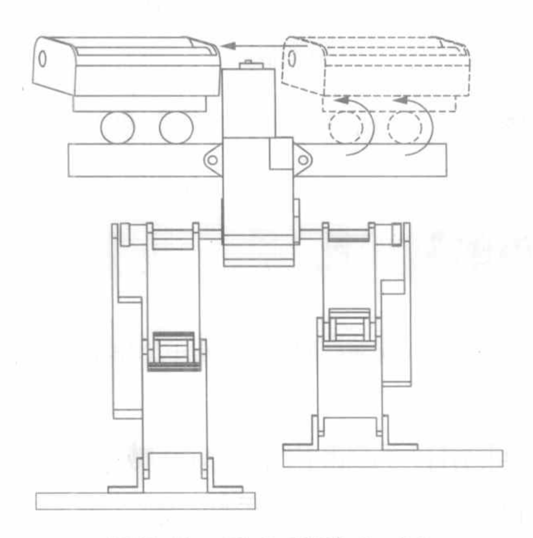


图3.5 重心移动方式1

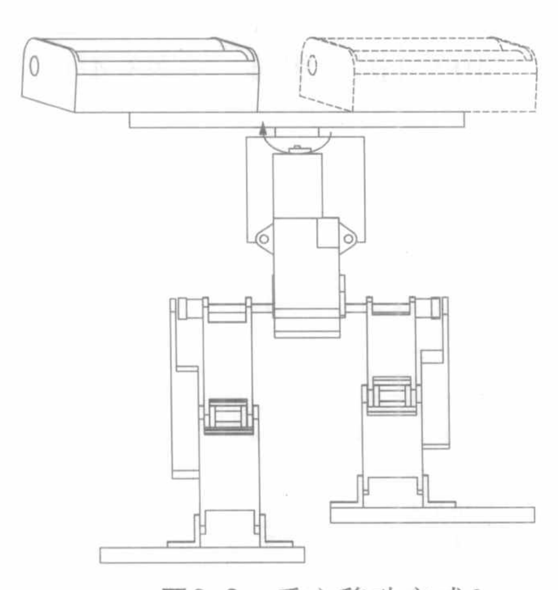


图3.6 重心移动方式2

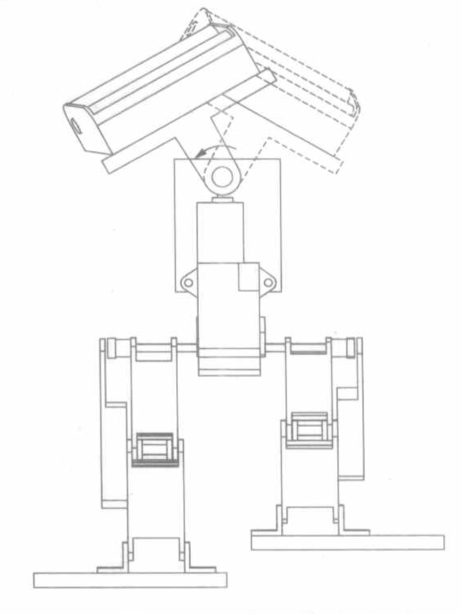


图3.7 重心移动方式3

图3.5的重心移动方式是在左右移动的台子上放上电池箱，重心在有电池箱那侧的脚上。重心在右脚上，故左脚可以悬空。

图3.6的重心移动的方式是在旋转的台子上放上电池箱，利用台子的旋转使重心移动到有电池箱侧的脚上。重心在右脚上，故左脚可以悬空。

图3.7的重心移到的方式是在左右倾斜的台子上放上电池箱，重心在倾斜侧的脚上。重心在右脚上，故左脚可以悬空。

在本章中制作的双足步行机器人，力求制作简单、外形美观，因此采用图3.7的结构。实际上，要把重心移到一只脚上，仅仅用2节3号电池的重量是不够的，要让电池、6P以及齿轮箱一起作为重心移动结构使之倾斜。

结构定下来了，接下来考虑前进和后退的方式。前进时，当抬起右脚向前迈步时，要使身体向左倾斜使重心加在左脚上，以取得平衡，如图3.8所示；同样，当抬起左脚向前迈步时，要使身体向右倾斜，把重心加在右脚上，如图3.9所示。

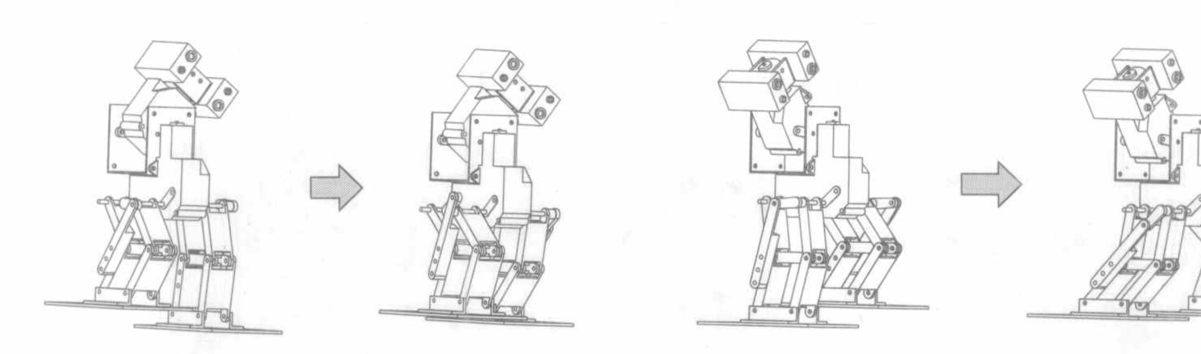


图3.8 抬起右脚前进（重心在左脚）　　图3.9 抬起左脚前进（重心在右脚）

后退时也一样，当抬起右脚向后迈步时，要使身体向左倾斜，把重心加在左脚上，如图3.10所示；抬起左脚向后迈步时，要使身体向右倾斜，把重心加在右脚上，如图3.11所示。

也就是说，无论前进与后退，身体倾斜的方向是和抬起的脚相反的。当把重心加到着地的脚上时，其双足步行就应该是直线。

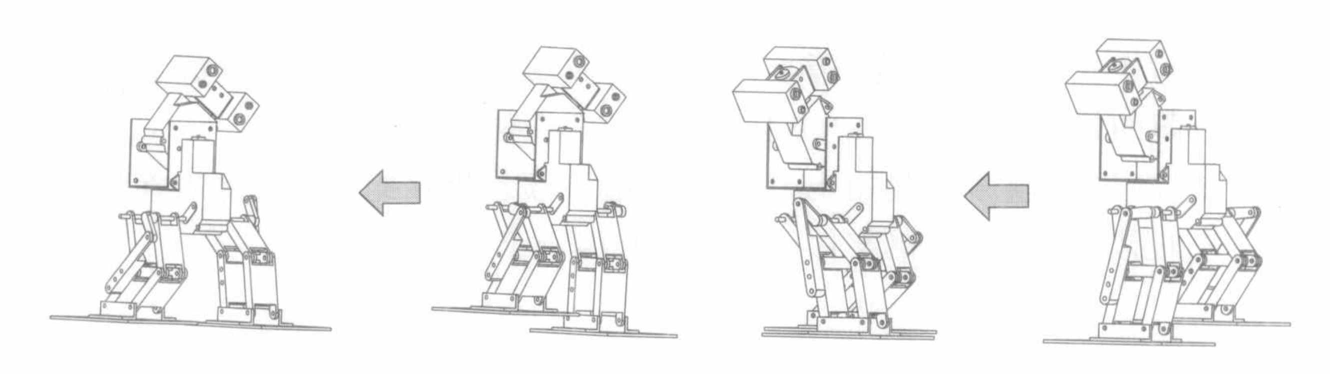


图3.10 抬起右脚后退（重心在左脚）　　图3.11 抬起左脚后退（重心在右脚）

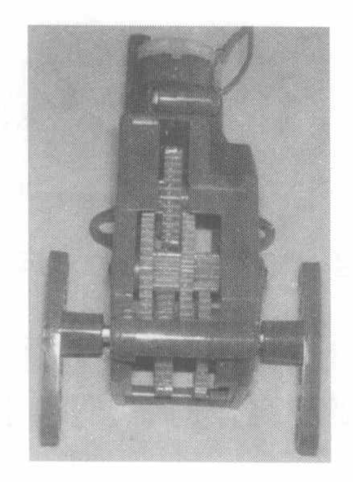
3.2 制作增加的曲柄齿轮箱

在第3章制作时需要的材料见表3.1。

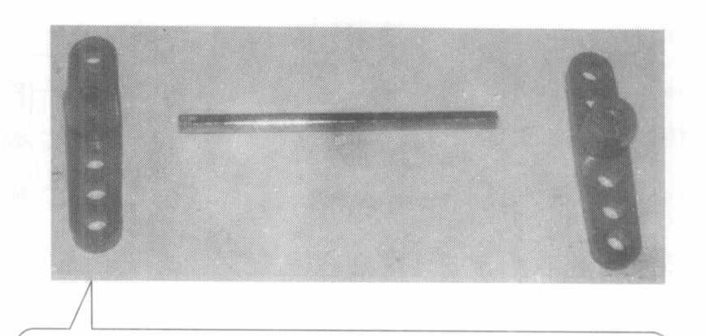
表3.1 在第3章制作时需要的材料

品 名	规 格	数量	购买地点	单价/日元
铝板	HS100×206，厚1.0mm	1	东急HANds	370
ABS板	330×245，厚2.0mm	1	东急HANds	548
胶木	3.1×22	2	铃商	10
田宫齿轮箱	4速曲柄齿轮箱	1	模型店	570
开关	6P扳扭开关	2	秋月电子通商	100
M3螺丝・螺母	M3×6螺丝，M3螺母	8	商店	5
电池	006P	1	商店	150
电池箱	3号电池×2节	1	秋月电子通商	60
电池揿钮接头	电池箱用	1	秋月电子通商	10

先把减速比为5402:1的齿轮箱准备好，如图3.12所示。



(a)组装完了的曲柄齿轮箱



把齿轮箱的轴按46mm的长度用金属锯截断，用虎钳固定结实后加工。加工的目的是让曲柄齿轮箱能安装在倾斜用箱上。

(b)把曲柄杆的轴按46mm的长度截断

图3.12 准备减速比为5402:1的曲柄齿轮箱

1.制作倾斜用箱

要制作重心移动结构，需要用铝板制作倾斜用箱。虽说是金属加工，但只是很薄的铝板，与第1章中的铝管一样，并不难加工。

图3.13中，倾斜结构由电机和电池箱的倾斜用箱组成，仍使用在第1章中制作的脚。新制作的铝零件尺寸如图3.14所示。

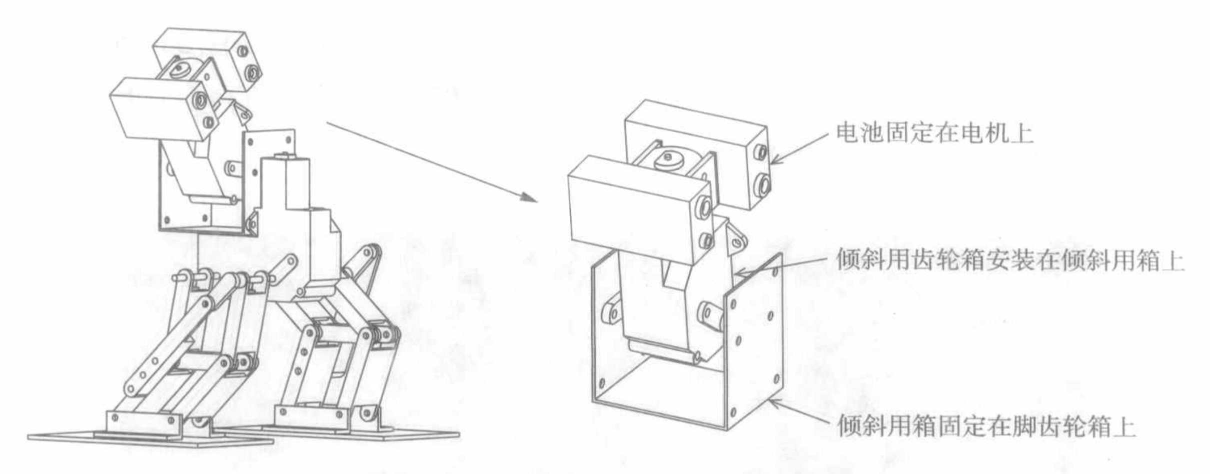


图3.13 电机和电池箱的倾斜结构

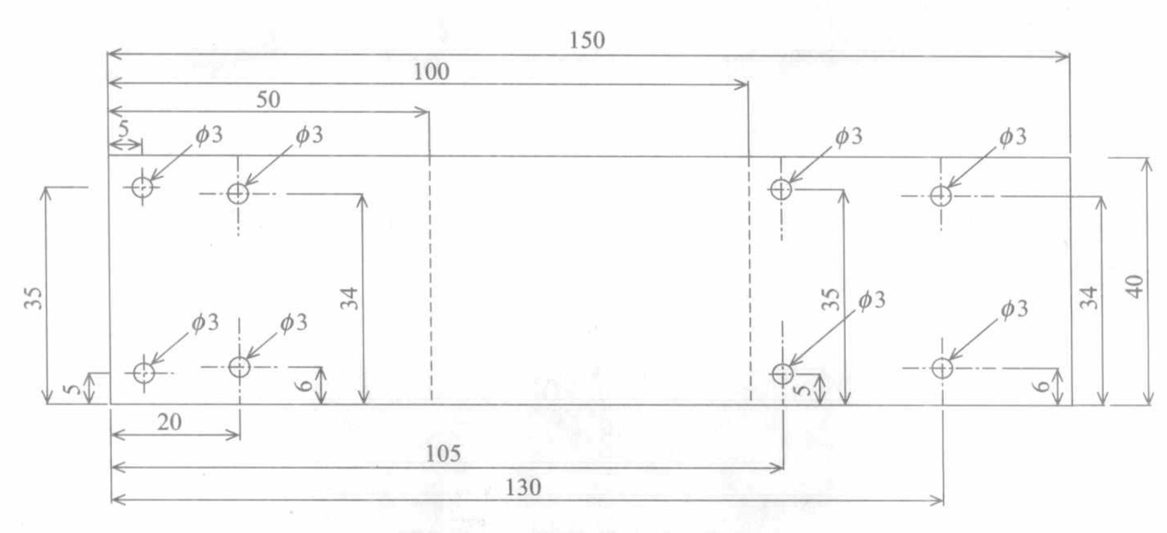


图3.14 铝零件的加工尺寸

先在铝板上按图3.14划线，再用钢锯按外形尺寸锯断。操作时，要在虎钳上固定结实。

如图3.15所示，先用钢锯从一侧开始锯，大约锯到中间位置时，再掉转方向从另一侧开始锯。

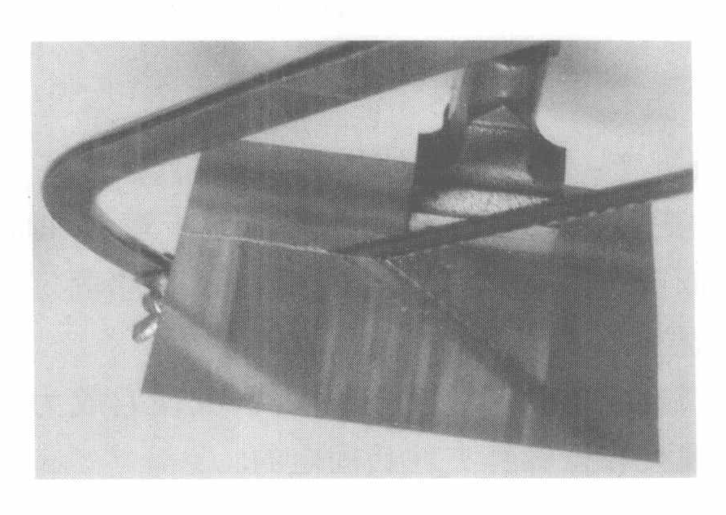


图3.15 铝板的锯断

截断后，在划有打孔位置的地方用打孔机打上记号，如图3.16所示。用电钻打孔，钻头的尺寸为$\phi 3$。打孔时，应将铝板放在稳定的台子上，用虎钳固定或用手按结实，一定要注意安全。

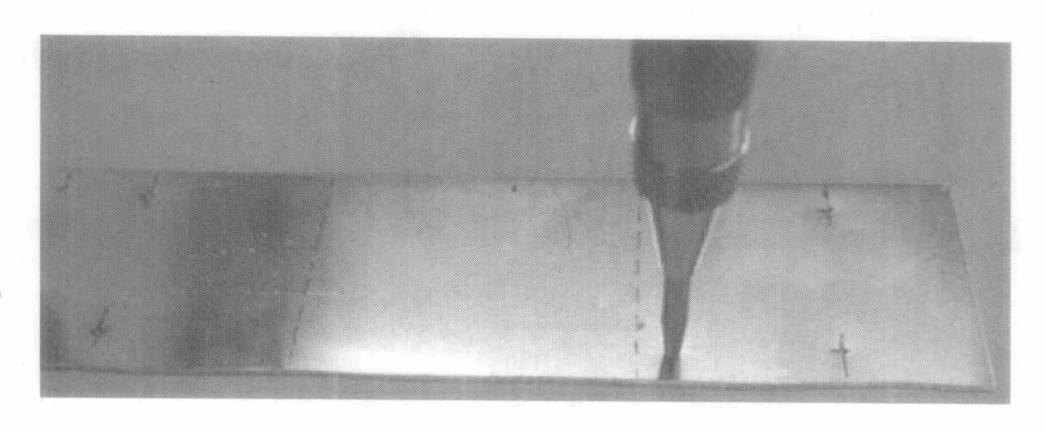


图3.16 用打孔机打上记号

图3.17中使用的台子是计算机的硬盘外壳，也可以放到木板上打孔，但木板也将被打上孔，所以在室内作业时要注意。

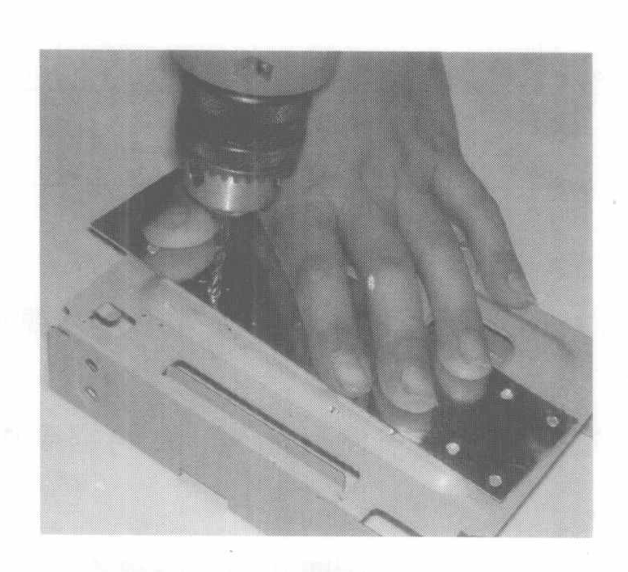


图3.17 在铝板上打孔（要注意安全）

把锯断的铝板折弯。折弯线应在虎钳的夹口处。

图3.18所示的虎钳，因夹口较窄小，不能使折弯线和虎钳的夹口一致，所以要用金属尺和什锦锉夹住后固定在虎钳上。如果固定得很结实的话，可以用手弯曲到图示位置。

因弯曲部带有圆度，所以要用锤子敲打圆处使它成为直角，如图3.19所示。此时也是用金属尺和什锦锉夹住后固定的。

图3.20是完成后的倾斜用箱，以下将在此箱上安装脚用齿轮箱和重心

移动用齿轮箱。

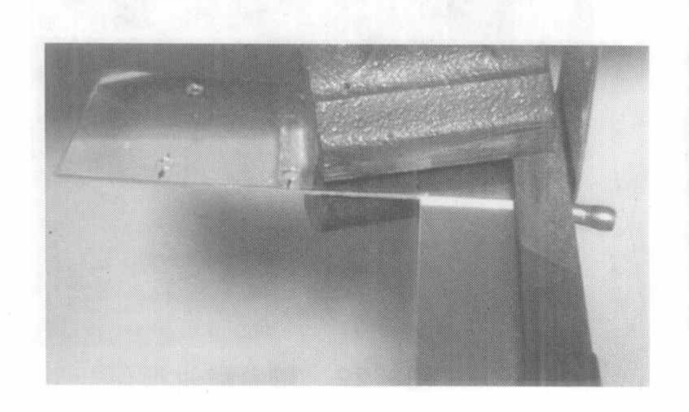


图3.18 折弯铝材

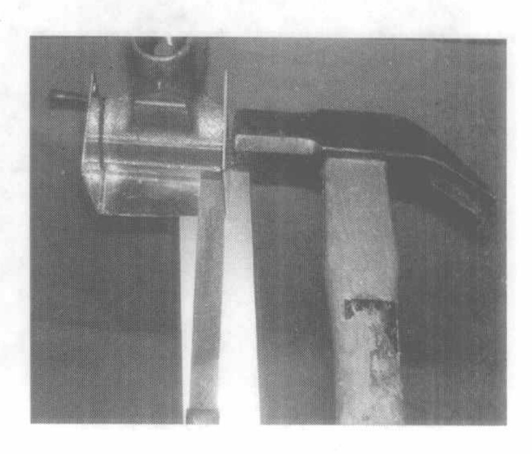


图3.19 最后用锤子加工

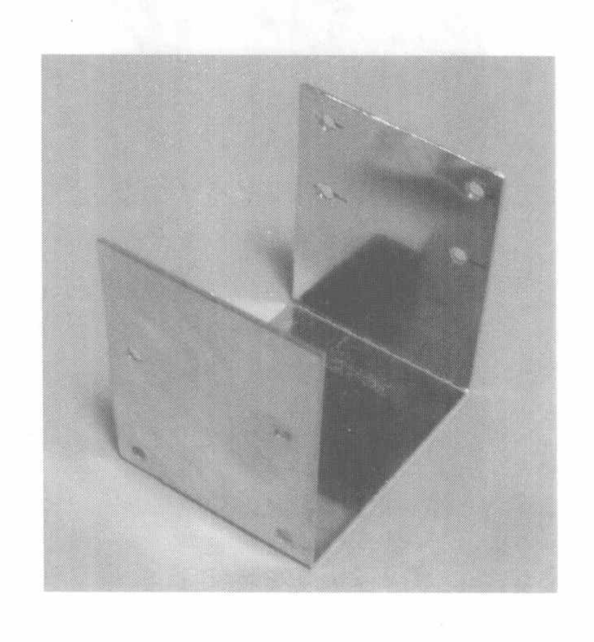


图3.20 完成后的倾斜用箱

2.安装脚用齿轮箱和重心移动齿轮箱

在完成后的倾斜用箱上安装重心移动用的齿轮箱，如图3.21所示。用4根M3的螺丝（M3×6）和螺母固定。

按照图3.21的安装方向，在齿轮箱上安装曲柄杆，再用螺丝固定在倾斜用箱上。

安装螺丝如图3.22所示。因为螺母的位置在倾斜用箱和齿轮之间狭窄的地方，所以要用尖嘴钳夹住螺母后再用螺丝刀拧紧螺丝。

到此，完成了一只脚的移动重心结构，如图3.23、图3.24所示。以下将制作安装电池的箱子。也就是说由于安装了这个电池，可以移动重心，从而把一只脚抬起来。

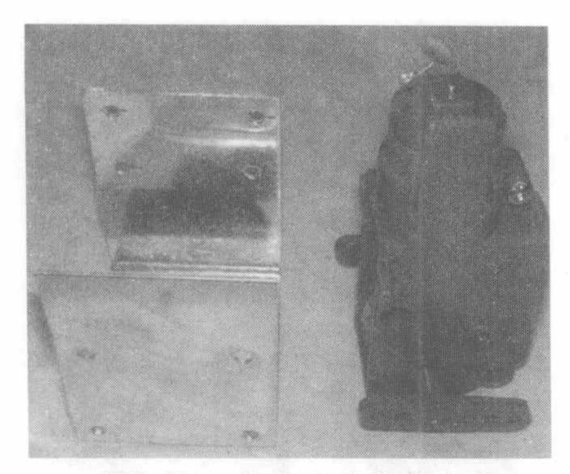


图3.21 齿轮箱的安装方向

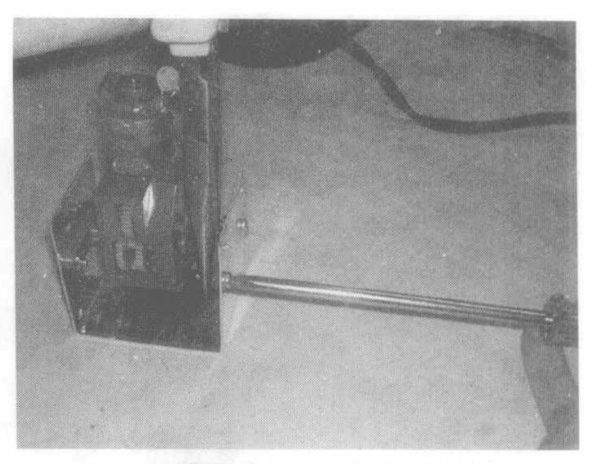


图3.22 用尖嘴钳抵住

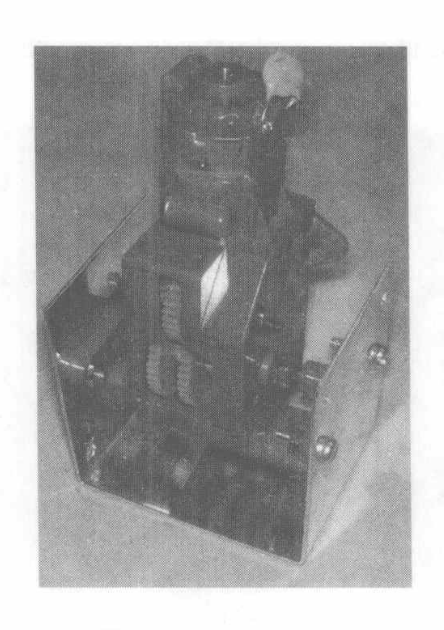
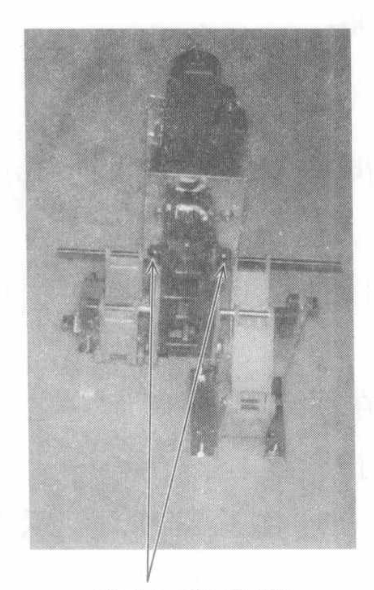


图3.23 安装完了



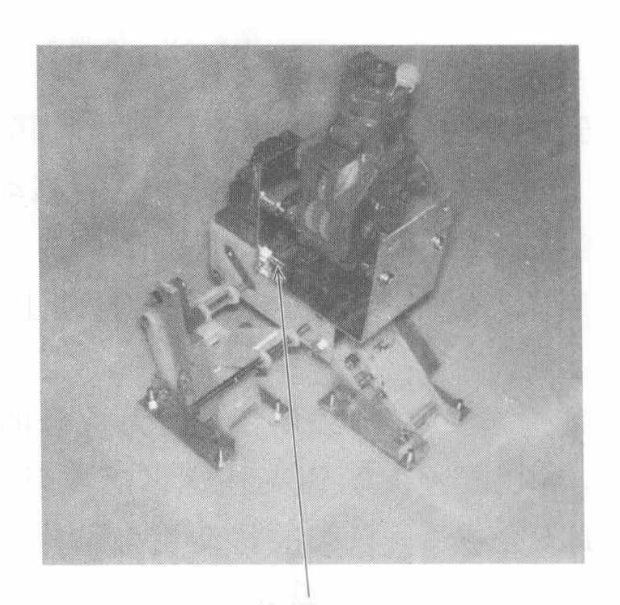
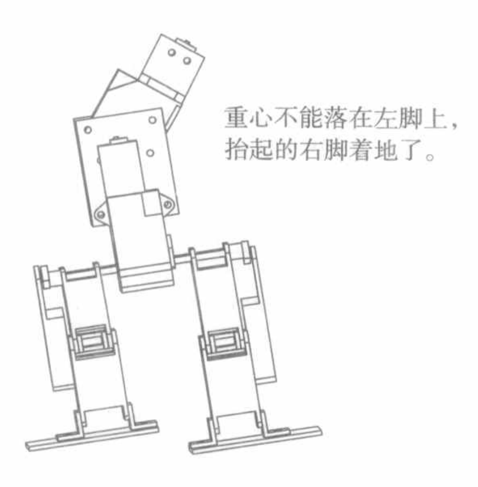


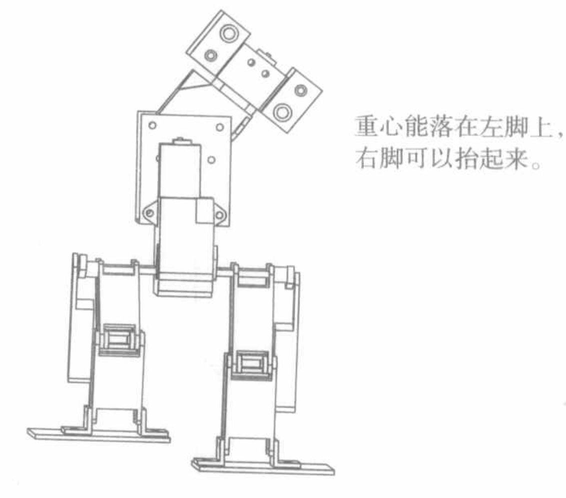
图3.24 在脚的齿轮箱上安装倾斜用箱

3.制作电池箱

如果没有这个电池，即使让倾斜用箱倾斜，抬起一只脚时身体仍向抬脚的方向倾斜，重心并没有完全移到一只脚上。如图3.25所示。



(a)抬起右脚使电机向左倾斜



(b)抬起右脚使电机和电池向左倾斜

图3.25 用于移动重心的电池

为了脚的移动和重心的移动，使用2节3号电池。即便如此，重量还是不够的，还要增加006P电池，这种电池在第5章中装载在微机里，作为微机电源。

为了安装电池，要制作电池安装箱。请准备新的ABS材料，按图3.26的尺寸划线。另外，材料⑥和⑦将在第5章使用。先在打孔位置用打孔机打上记号，再用电钻打孔。钻头尺寸为ϕ3，材料在裁断前要固定结实并要注意安全。裁好后的材料用ABS粘接剂粘接，请对照图3.26中的顺序。

粘接过程如图3.27～图3.31所示。

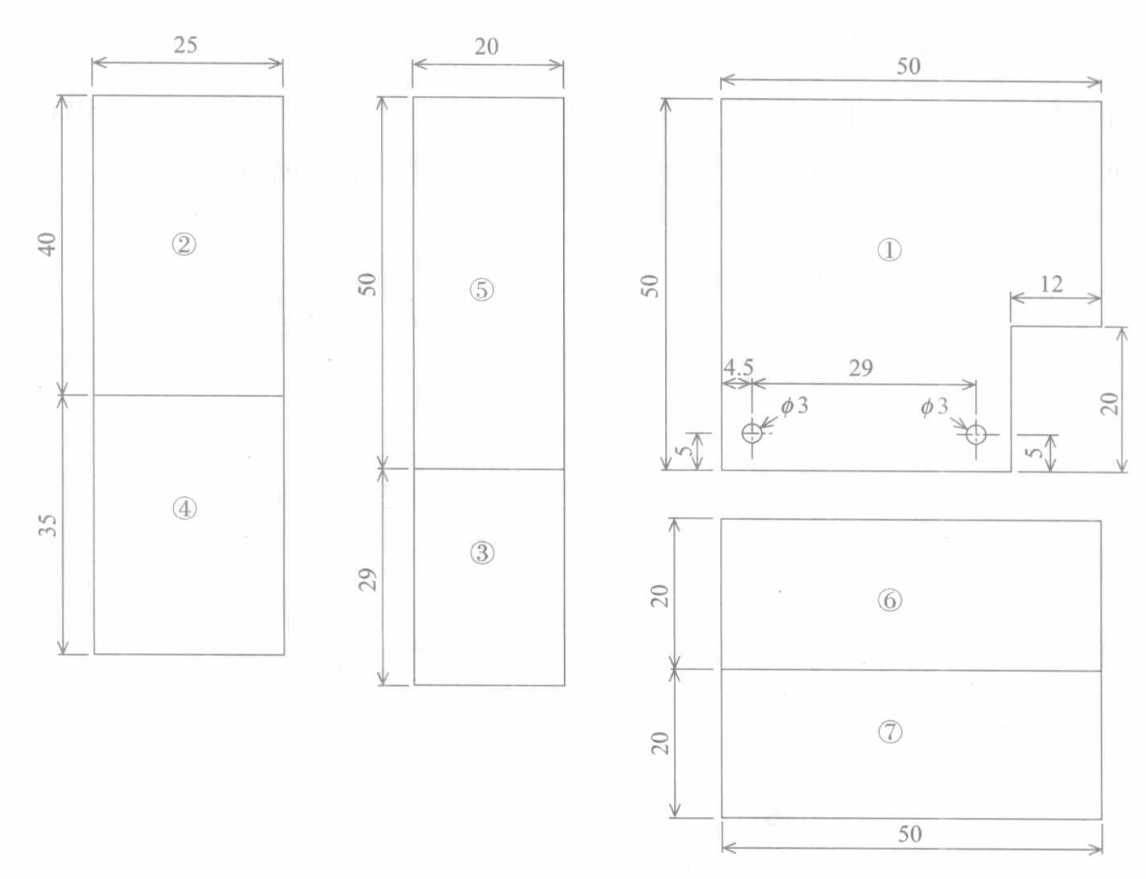


图3.26 电池安装箱的尺寸图

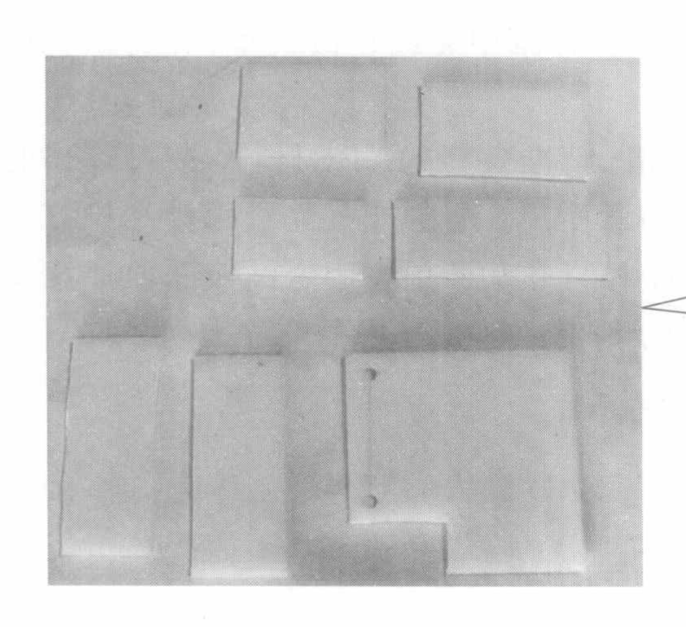


图3.27 切好的材料

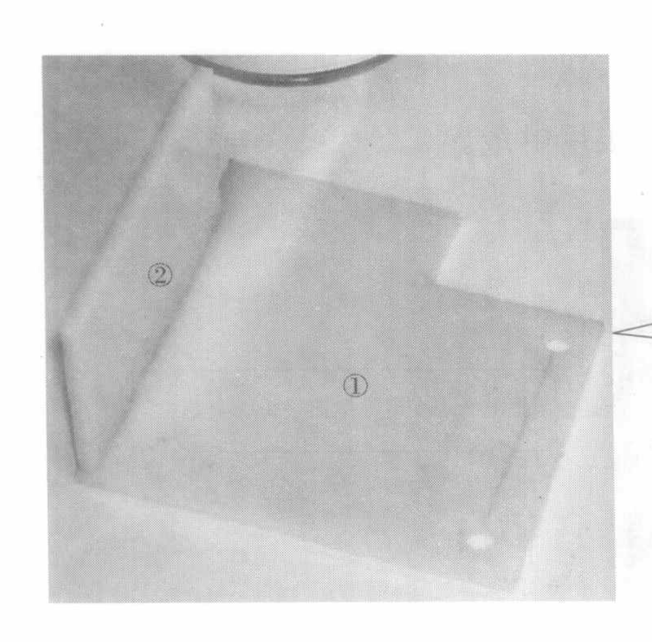


图3.28　材料①和材料②的粘接

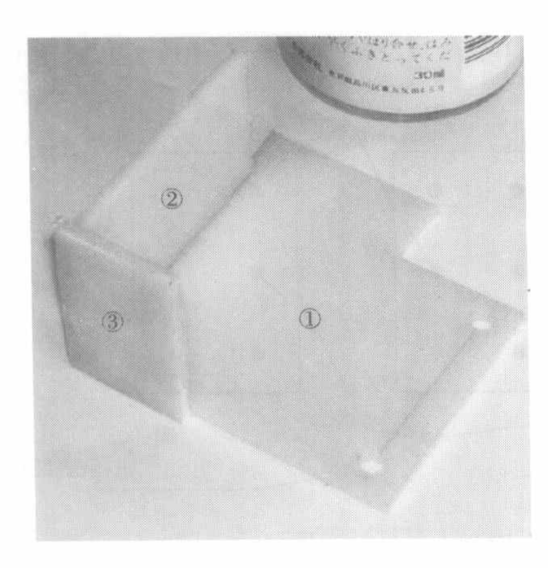


图3.29　粘接材料③

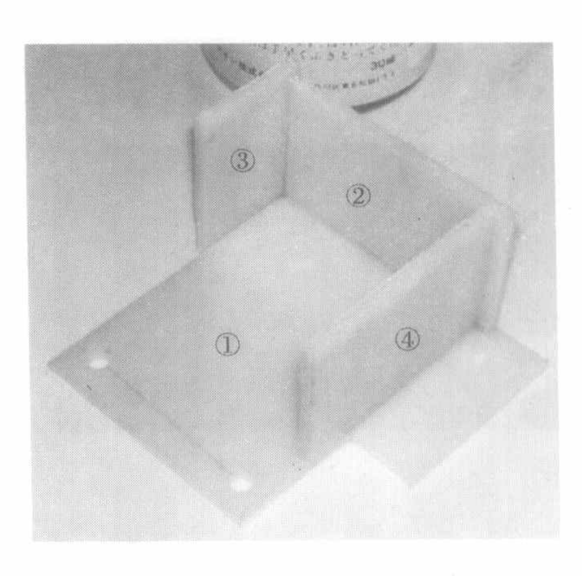


图3.30　粘接材料④

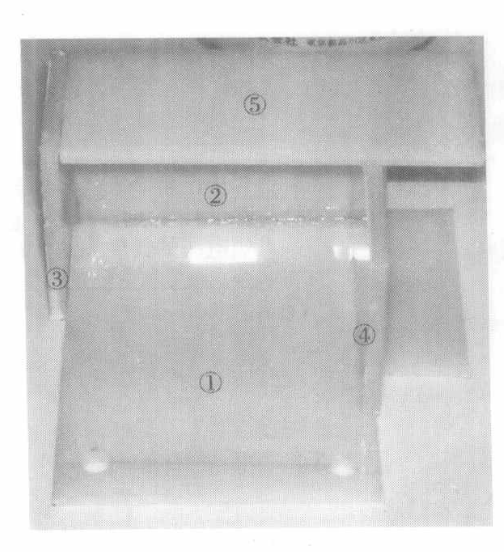


图3.31　粘接材料⑤

到此，电池安装箱的制作完毕。

4.焊接电线

如图3.32～图3.34所示，准备连接用电线。

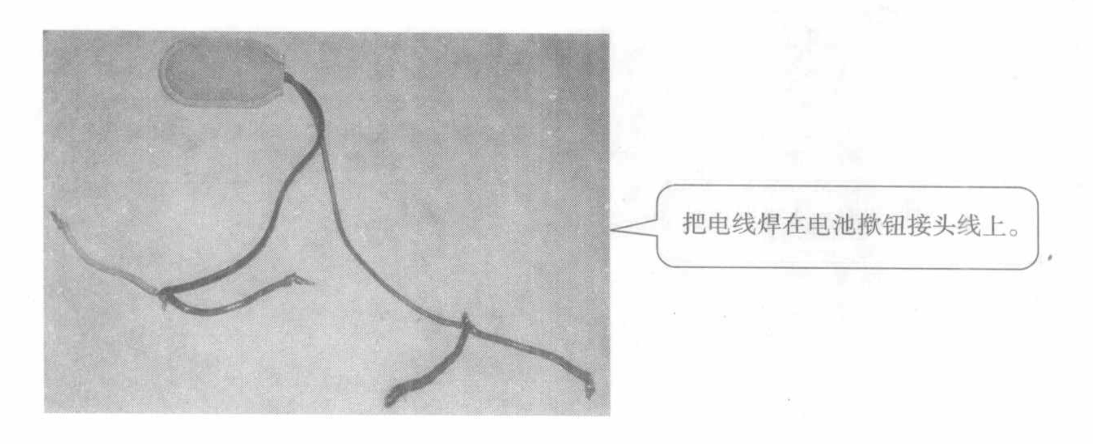


图3.32 电池揿钮接头线的焊接

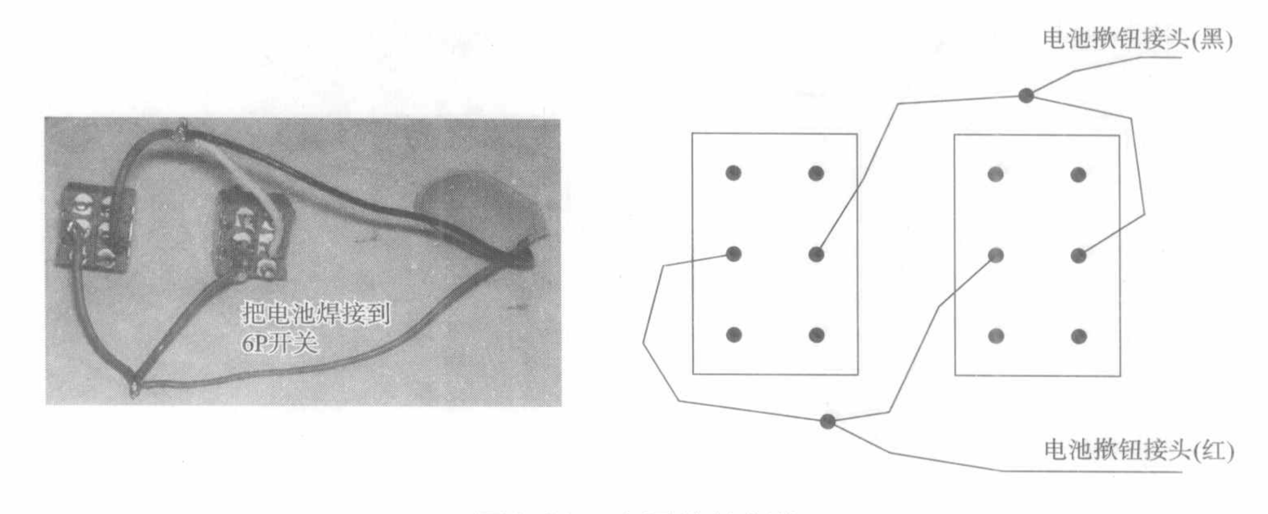


图3.33 电源线的焊接

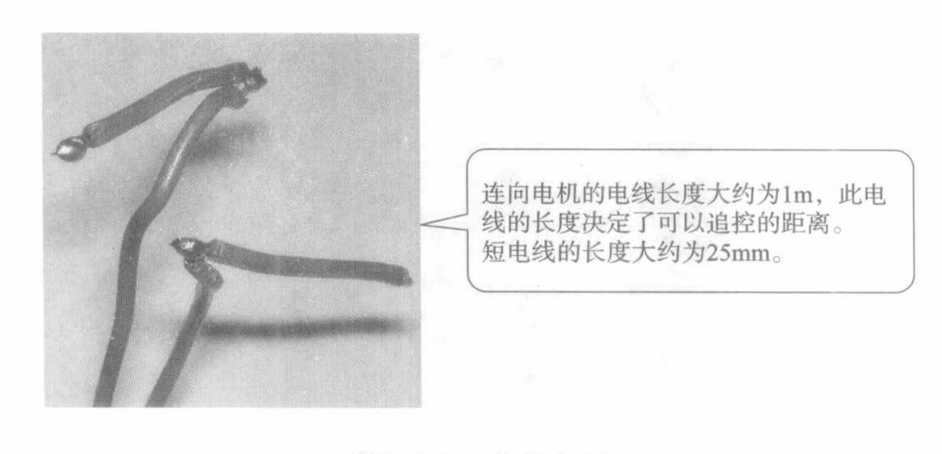
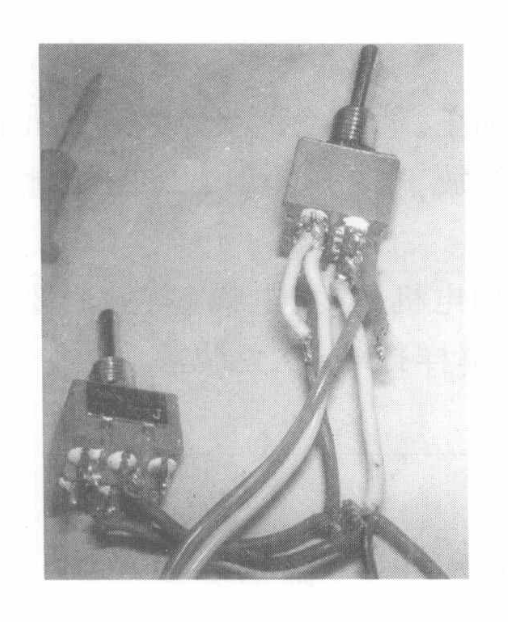


图3.34 准备电线

如图3.35～图3.37所示，把连向电机的线焊在6P开关上。



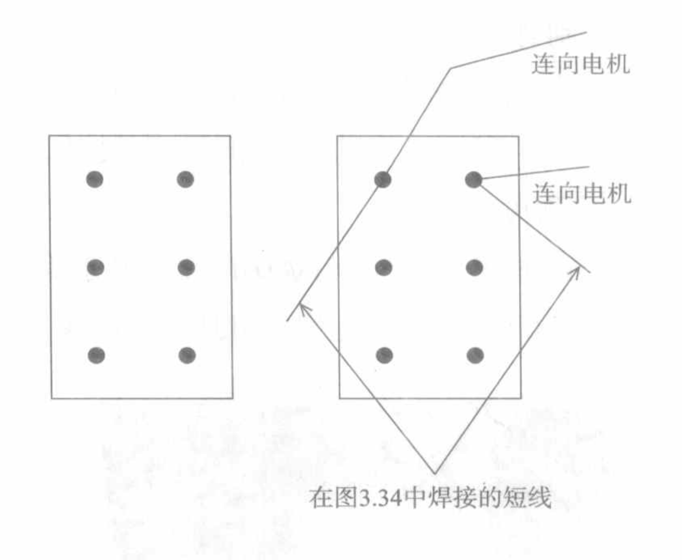


图3.35 把连向电机的电线焊在开关上(1)

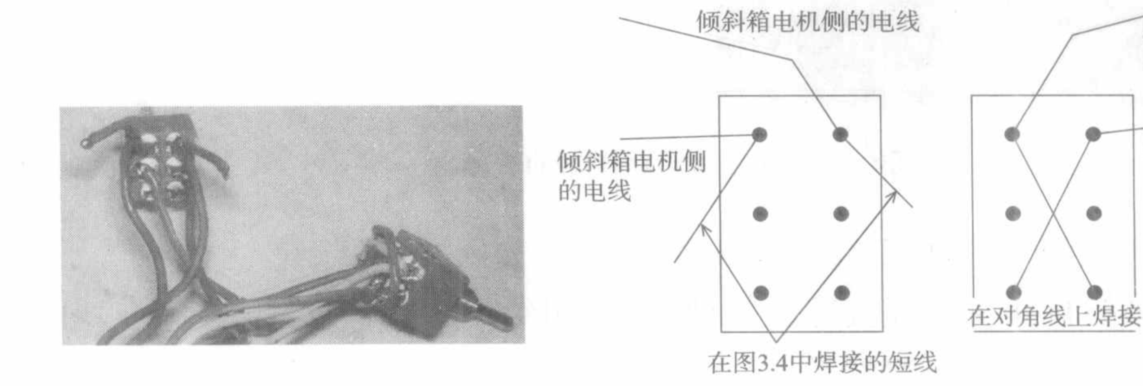
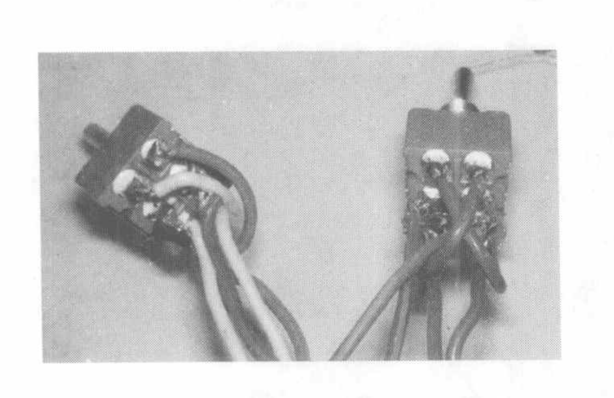
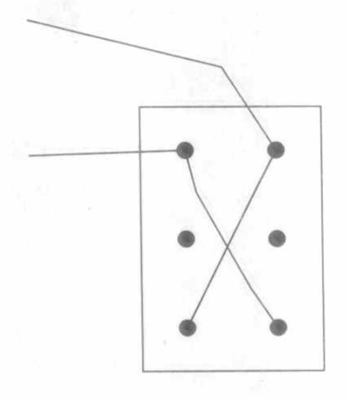


图3.36 把连向电机的电线焊在开关上(2)





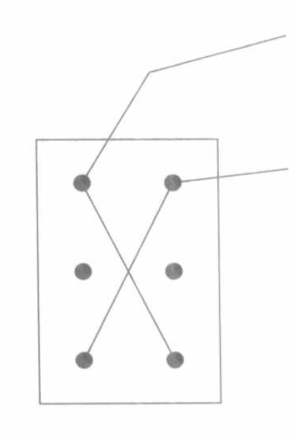
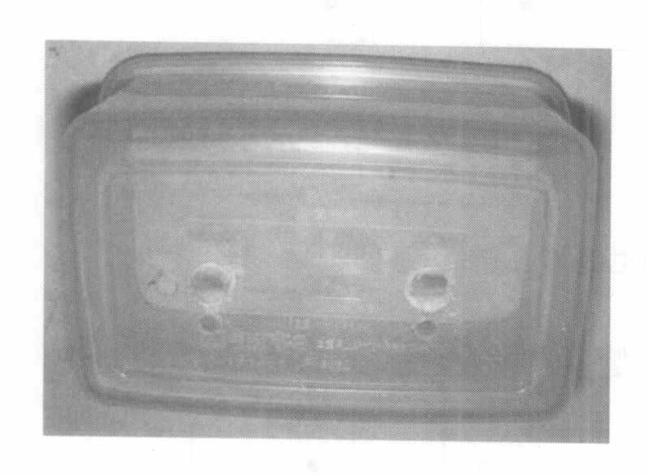


图3.37 把连向电机的电线焊在开关上(3)

5.制作遥控器

把在商店里购买的食品盒按图3.38进行加工。食品盒的大小约为90mm×60mm×55mm，也可不拘于此尺寸，只要能放下6P开关和2节3号电池的电池箱就可以了。

在食品盒的侧面打ϕ6的孔，用于穿过连向电机的4根电线。打孔时要注意安全。在孔的内侧，电机的电线要像图3.39那样打结，以免脱落。



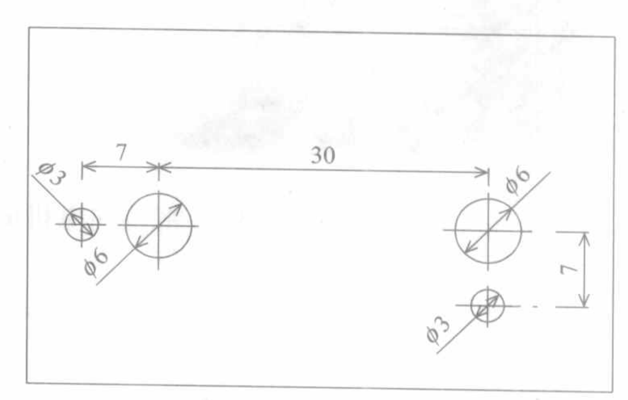


图3.38 加工用于遥控器的食品盒

将6P开关安装在加工后的食品盒的孔上，如图3.40所示。

电池揿钮接头线的焊接部分是裸线，要用绝缘塑料带包好。

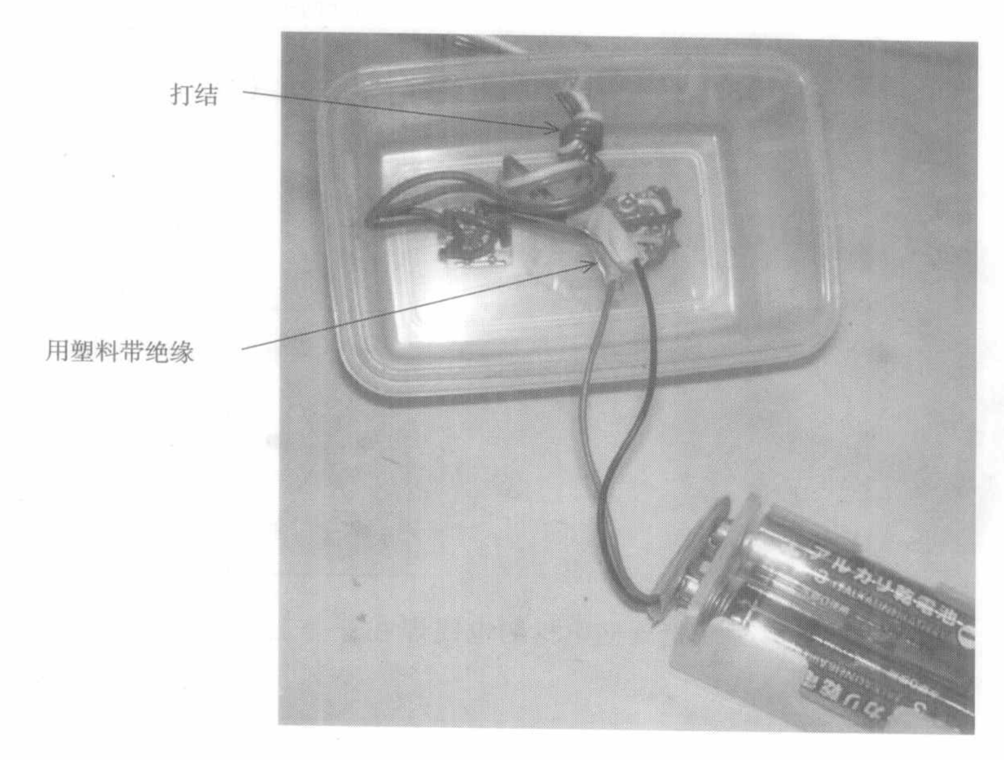


图3.39 食品盒里的电线

将6P开关穿入ϕ6的孔后固定，如图3.40所示。

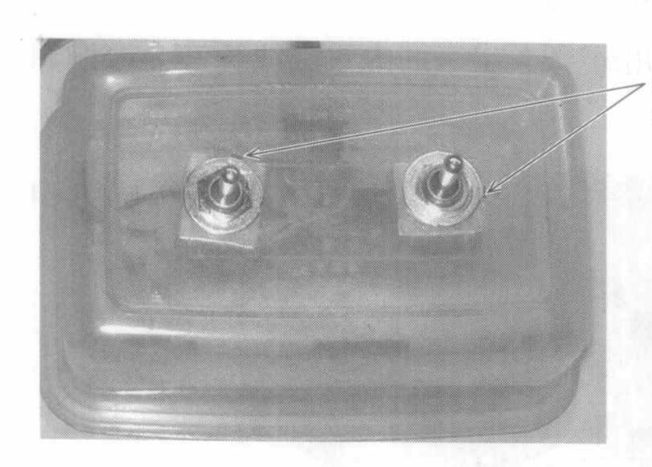


图3.40 6P开关的固定

把电池箱装进食品盒中，如图3.41所示。

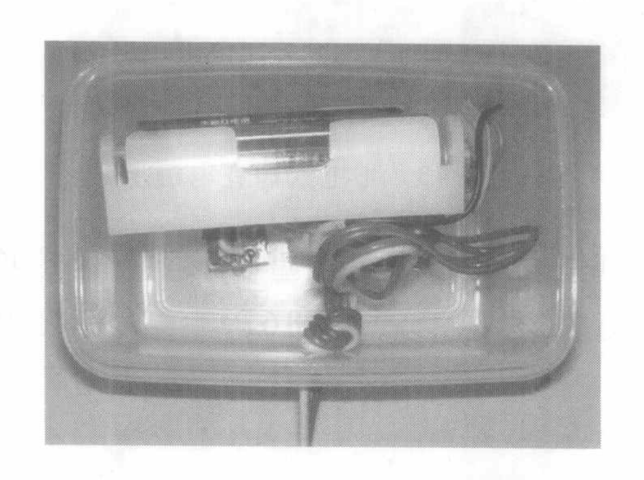


图3.41 把电池箱装进食品盒

盖上食品盒的盖子后，便完成了遥控器的组装，如图3.42所示。

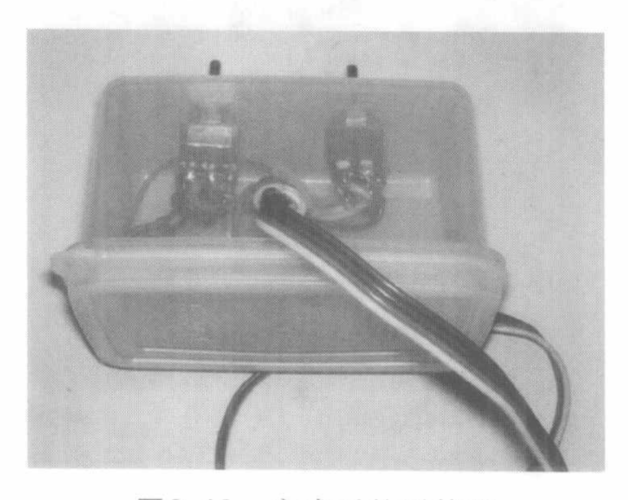


图3.42 完成后的遥控器

6.总装及改进

把从遥控器出来的4根电机电线焊在电机上，从脚用6P开关出来的电机电线焊在脚用电机上，从重心倾斜用6P开关出来的电机电线焊在重心倾斜用电机上，如图3.43所示。

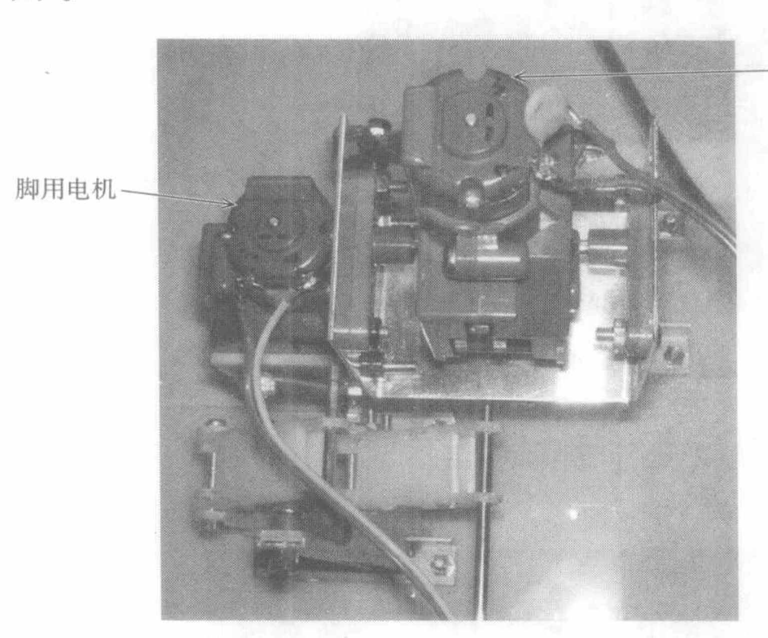


图3.43 把电线焊在电机上

用M3螺丝和螺母把电池箱固定在重心倾斜用齿轮箱的安装孔上，如图3.44所示。用双面胶把3号电池盒和006P电池固定在电池安装箱上，如图3.45所示。

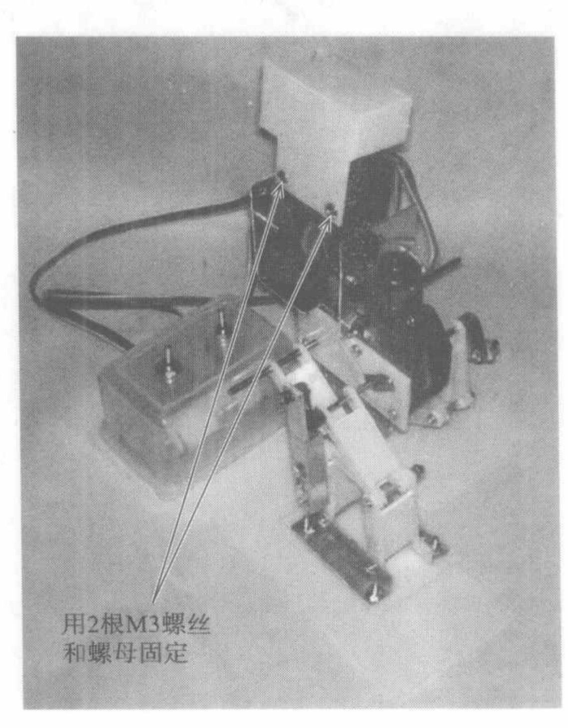


图3.44 电池安装箱的固定

在这种状态下，合上开关让机器人动一动，不是很稳定吧？原因在于脚底，脚底上露出了固定机器人脚面用的螺丝头。因此，当脚着地时，并不是整个脚底都着地，而只有4个螺丝头着地。要进行改进，和从前一样，用塑料切断刀切下两块50mm×65mm的ABS材料。

如图3.46、图3.47所示，把脚底材料上的4个ϕ3孔扩大到ϕ8。打孔时，一定要用虎钳固定结实，用手按压是危险的。因为打的孔较大，要把电钻拿结实；如果有扩孔器的话，用扩孔器扩大ϕ3的孔比较安全。

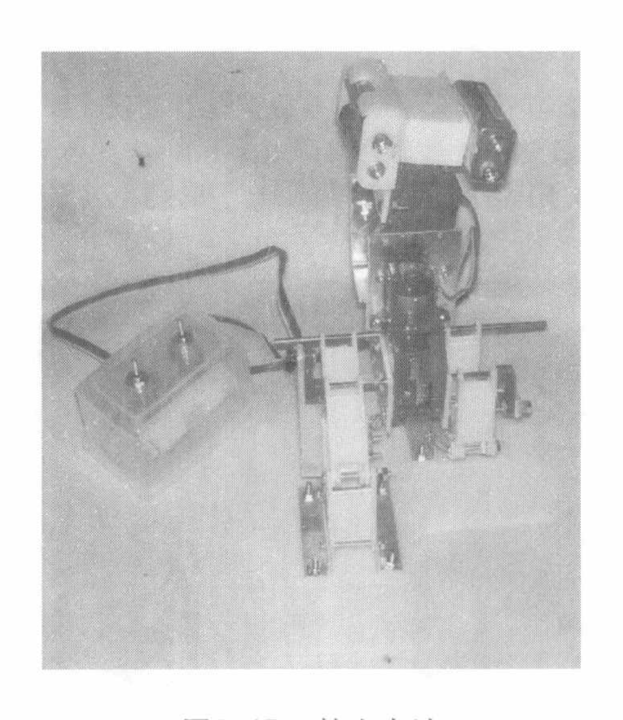


图3.45 粘上电池

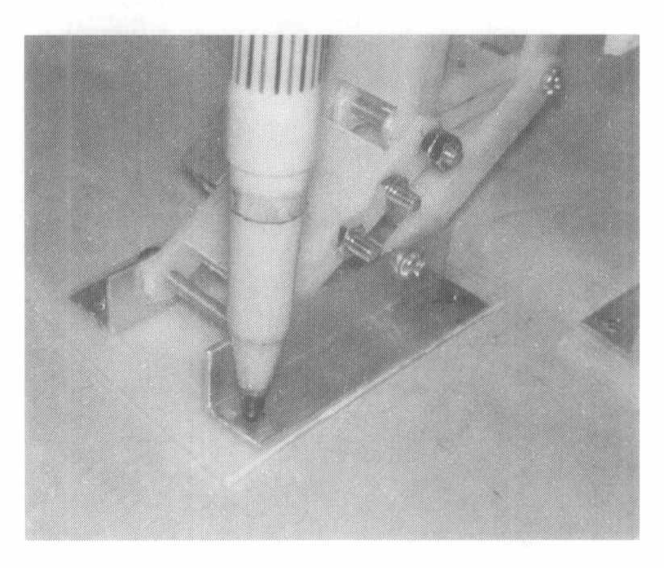


图3.46 划 线

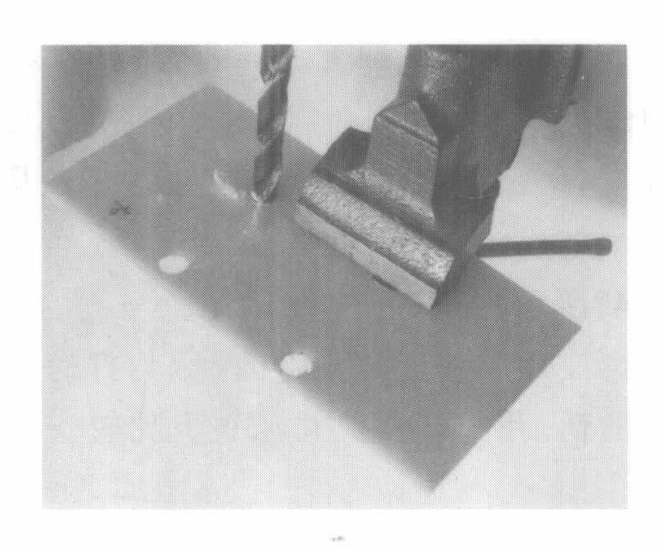


图3.47 把孔扩大（用扩孔器较安全）

把新加工的脚底板用双面胶贴在脚底，如图3.48～图3.49所示。最终作品如图3.50所示。

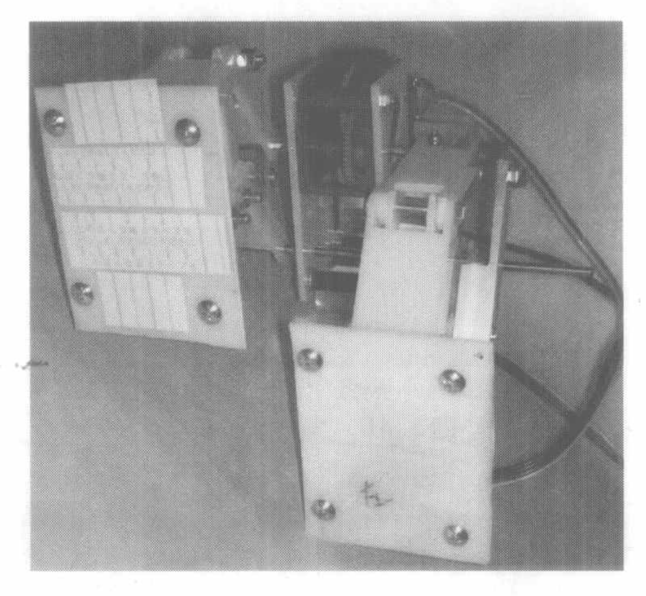


图3.48 在脚底上安装增加的脚底板

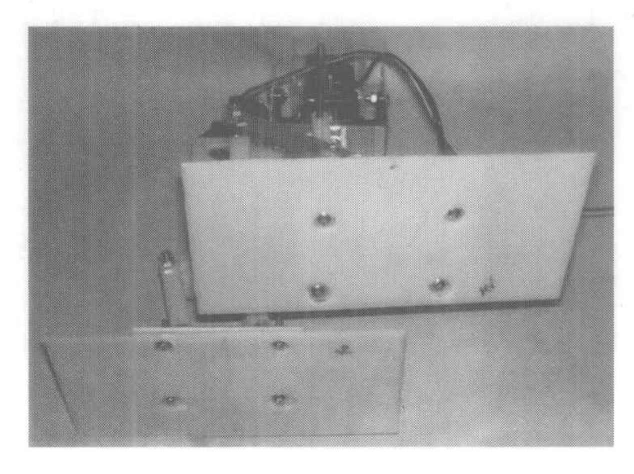


图3.49 贴到原来的脚底板上

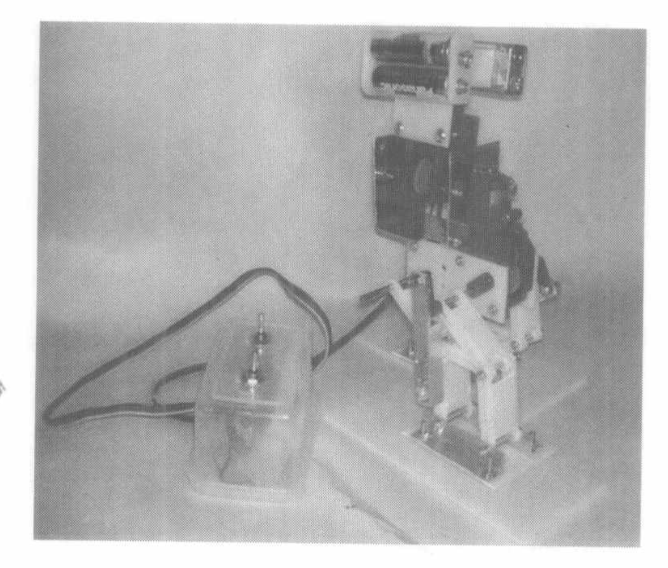


图3.50 在第3章里完成的双足步行机器人

3.3 直线前进、直线后退的双足步行实验

让我们实验一下重心能否移动。

操作倾斜用电机上的控制开关：开始时使上身向右倾斜（图3.51），再使身体向左倾斜。如果左右方向能够确认的话，在遥控器的开关侧面用记号笔写上左、右两字，以便操作。

如图3.52所示，上身向左倾斜着。想一想，哪只脚会向前迈步？操作遥控器上和脚的电机相连接的开关，使脚的电机转动，此时左脚向前迈步了吧？

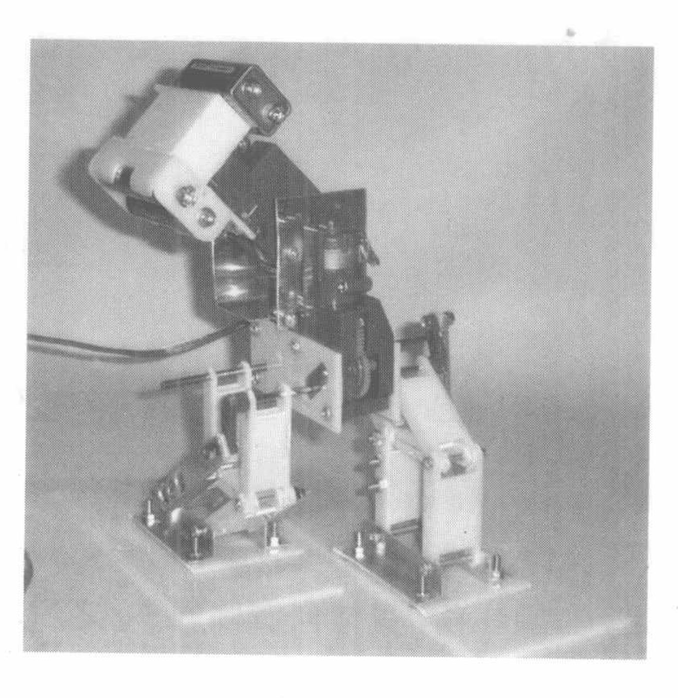


图3.51 使上身向右倾斜

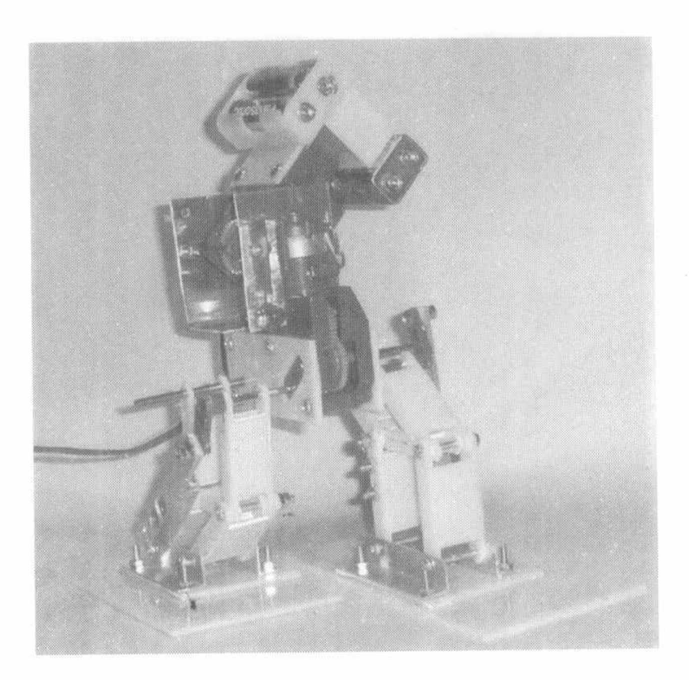


图3.52 使上身向左倾斜

图3.53的情况是，左脚在前，身体向左倾斜着。操作遥控器上的开关，让右脚向前迈步，如图3.54所示。这中间的过程应该是右脚边抬起边向前迈步，再落地。

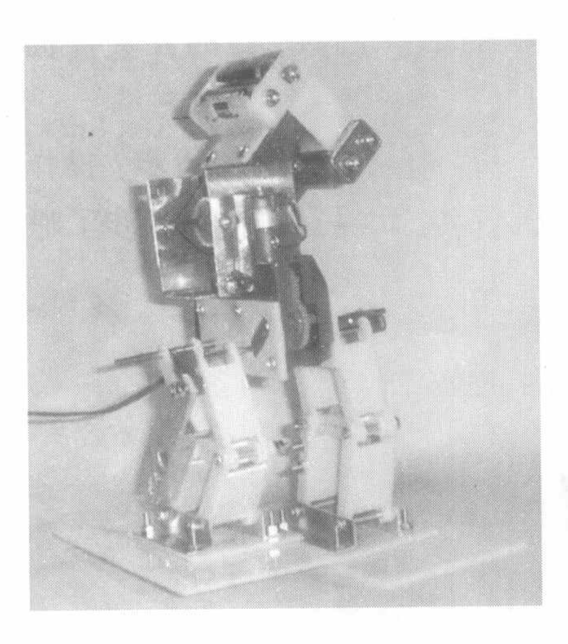


图3.53 右脚在向前移动的同时抬起来

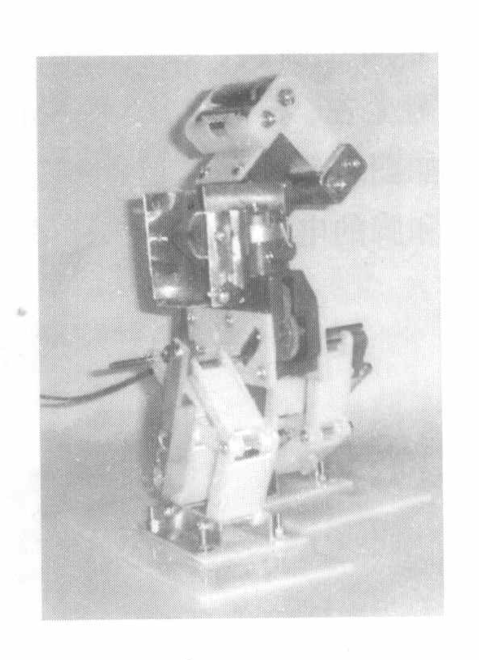


图3.54 右脚迈步以后着地

当前进、后退确定以后，在遥控器的脚电机用开关的旁边，用记号笔写上“前”和“后”，以便操作。

图3.55的情况是，右脚在前，身体向右倾斜了。之后，将是抬左脚，如图3.56所示。所谓前进，就是这些动作的反复进行。

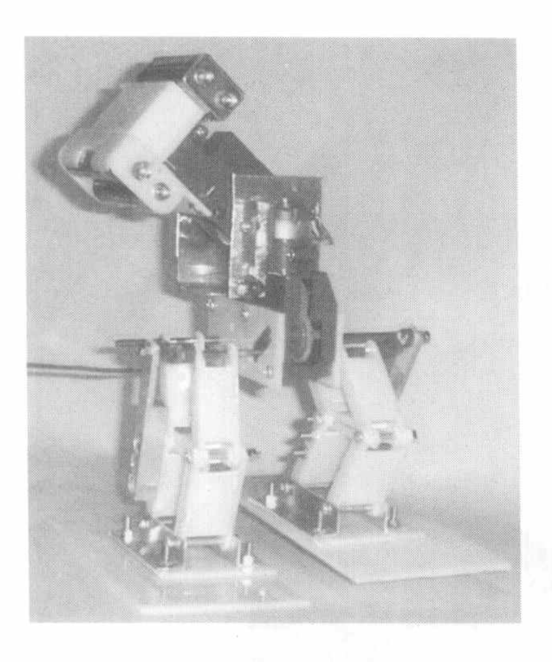




图3.55 左脚在向前移动的同时抬起

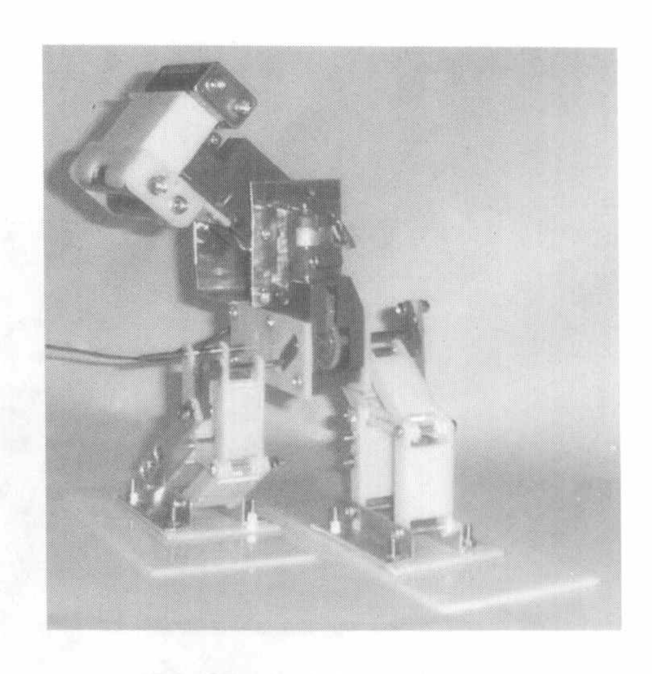


图3.56 左脚向前迈步后着地

如果是从右脚在前的状态开始，则：
右倾斜→左脚前→左倾斜→右脚前→右倾斜……如此反复进行。

如果是从左脚在前的状态开始，则：
左倾斜→右脚前→右倾斜→左脚前→左倾斜……如此反复进行。

也就是说，前进时，使身体向往前伸出的脚的那一方倾斜，另一只脚向前迈步就可以了。大家一定明白机器人双足步行时的样子了吧：把身体的重心加到一只脚上，另一只脚处于抬起状态。

后退时，让脚电机的旋转方向和前进时相反。看看图3.57，机器人的哪只脚在后？如果左脚在后，就要转动电机使右脚向后迈步，在这种状态下使身体向右倾斜。

左脚在向后移动的同时抬起，向后移动后着地，如图3.58、3.59所示。

向后步行了一步。现在的情况是左脚在后，那就使身体向左倾斜。然后，再使右脚向后移动，如图3.60、图3.61所示。后退步行就是这些动作的反复进行。

如果是从右脚在后的状态开始，则：
右倾斜→左脚后→左倾斜→右脚后→右倾斜……如此反复进行。

如果从左脚在后的状态开始，则：
左倾斜→右脚后→右倾斜→左脚后→左倾斜……如此反复进行。

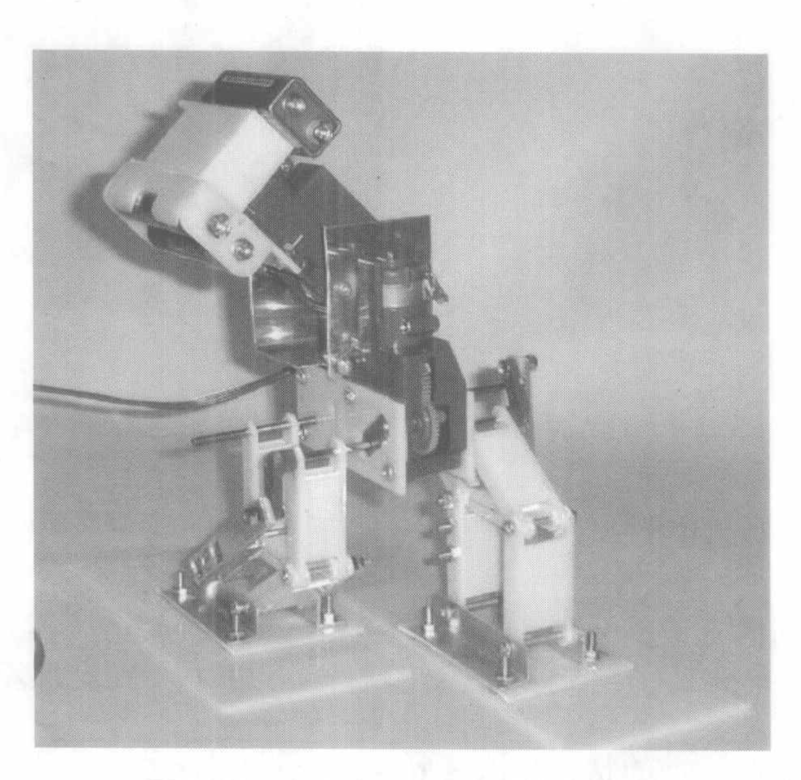


图3.57 右脚在后、向右倾斜的样子

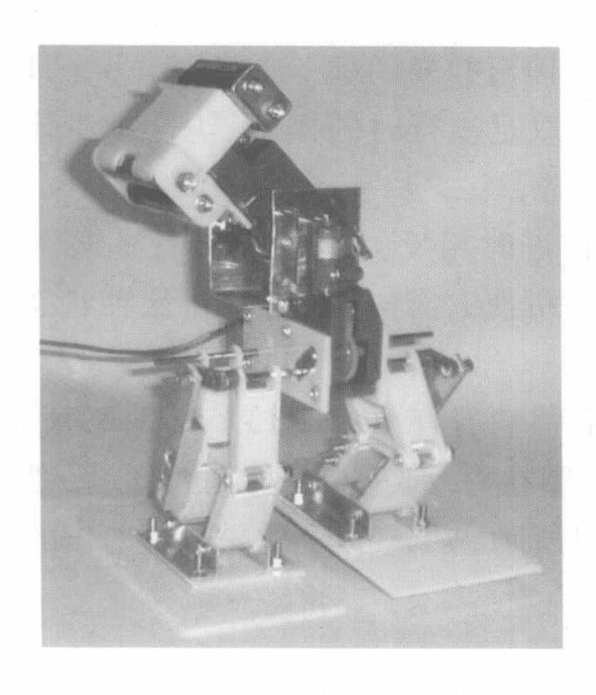


图3.58 左脚在向后移动的同时抬起

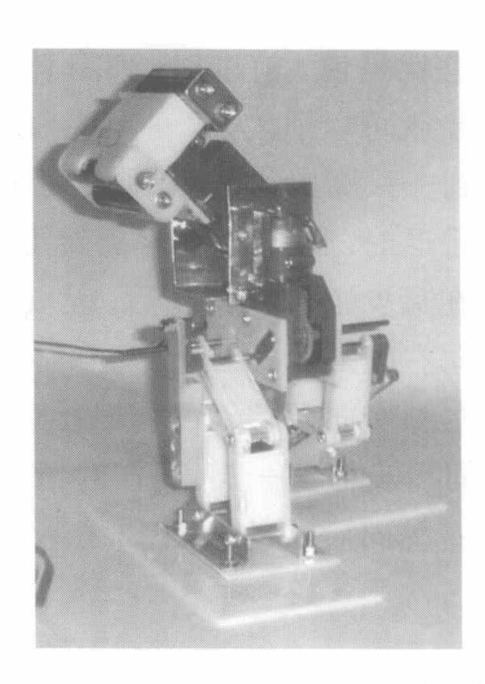


图3.59 左脚向后迈步后着地

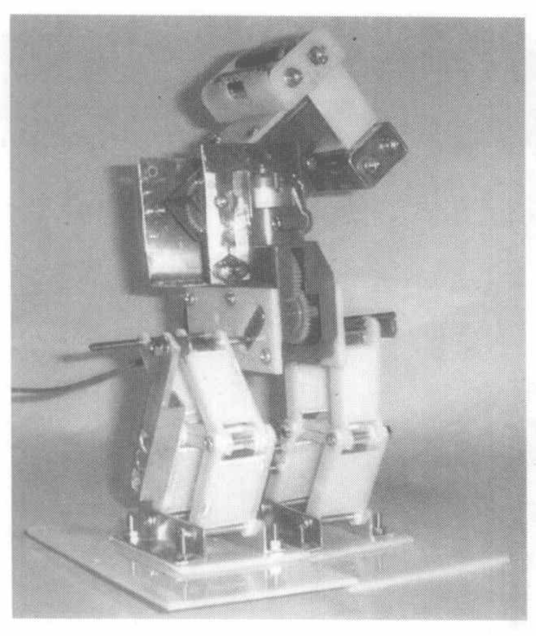


图3.60 右脚在向后移动的同时抬起

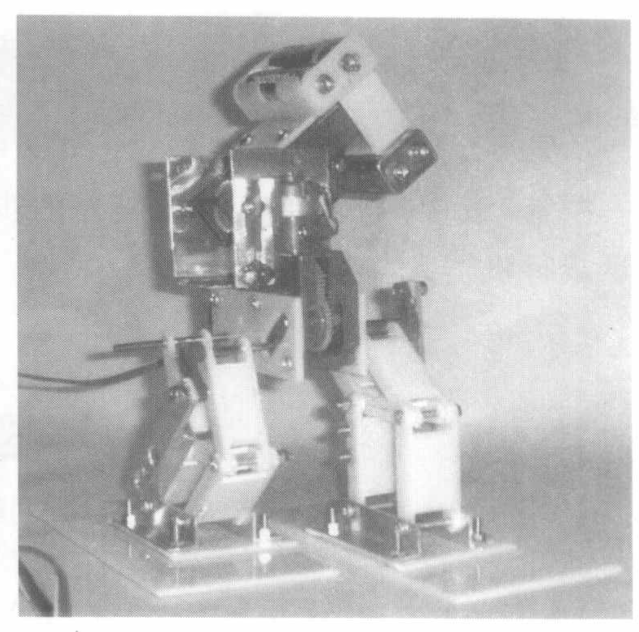


图3.61 右脚向后迈步后着地

到此，实现了直线前进、后退的双足步行。重心倾斜使重心移动得到控制，所以可以用改变重心倾斜度的大小进行各种实验。

试着改变一下重心的倾斜度，如图3.62所示。如果重心的正下方没有着地脚（支撑区），身体就会倾斜，行走的直线性就会变差。

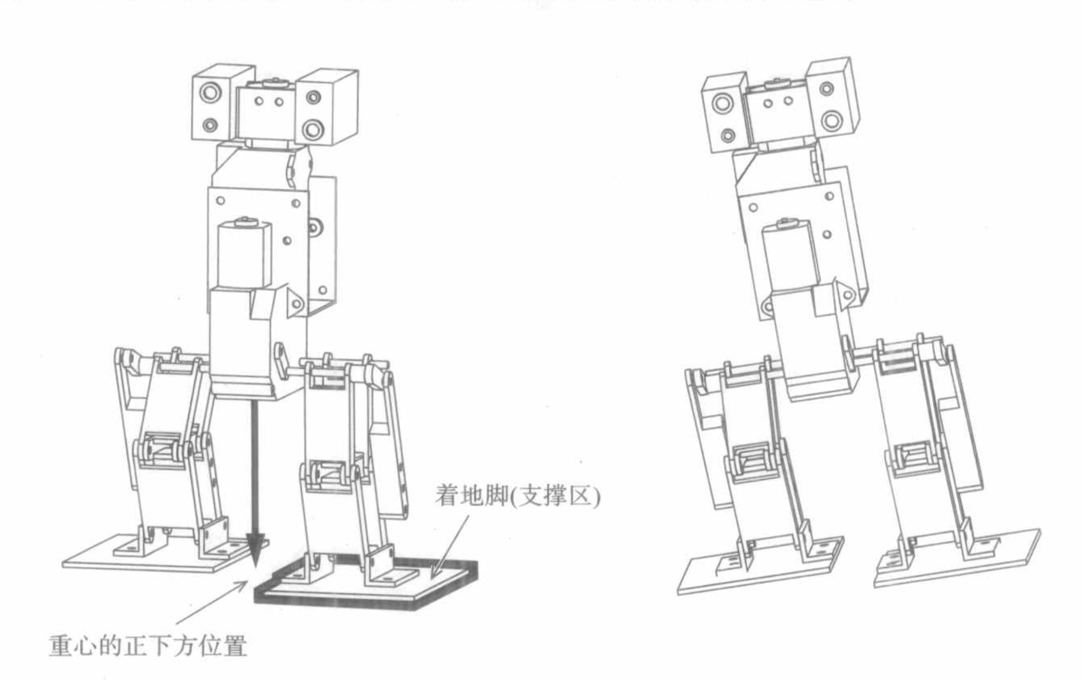


图3.62 重心的正下方如果没有着地脚，抬起的脚便不能悬起，身体倾斜

由此得出：要使双足步行具有很好的直线性，就要具有图3.63所示的那种状态。

要使双足步行具有很好的直线性，重心的正下方要有着地脚（支撑区），通过重心移动，使抬起的脚悬起来步行。

在第4章中，将利用直线性较差的步行方式，使机器人成长为会转弯的双足步行机器人。

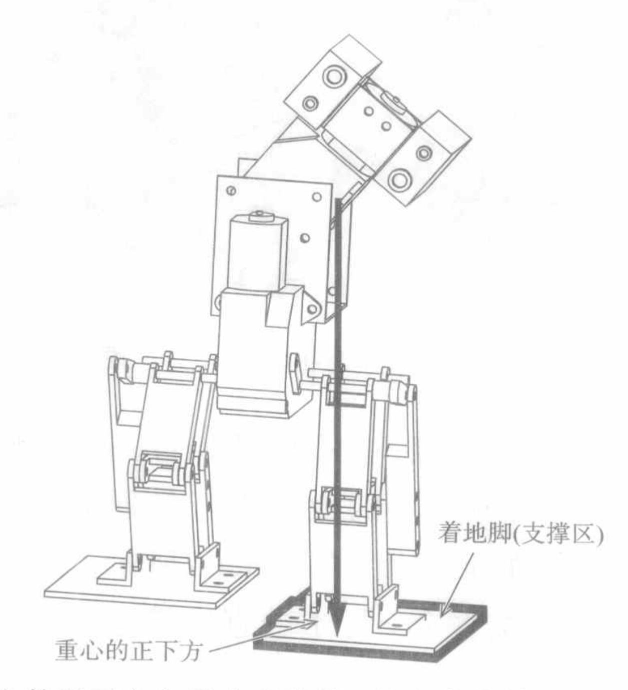
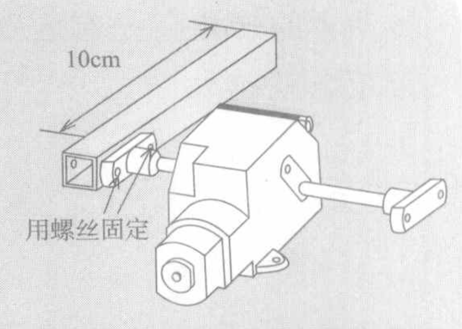


图3.63 重心的正下方如果有着地脚，抬起的脚就能悬起来行走

实验·理解

减速比和转矩的实验

双足步行机器人所用电机的一个重要性能是转矩。所谓转矩，就是转动时所需要的力，如果转矩不足，就不能使双足步行机器人动作。



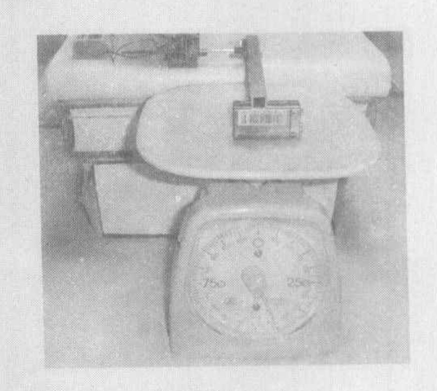
在齿轮箱的曲柄杆上安装臂杆

能正确地求出转矩并不是件容易的事。但在这里，是以感受到转矩存在这一目的，试着求出电机（4速曲柄齿轮箱）的转矩。

首先是用于重心倾斜的齿轮箱。记得在第1章中曾用铝方管制作过“长10cm的臂杆”吧，把此臂杆用M3的螺丝和螺母安装在齿轮箱的曲柄杆上。


装置全景

在齿轮箱上，安装带开关的3号电池箱。然后，在家庭用的天平上，放上安装在齿轮箱上的臂杆。为了使臂杆的前端与地面平行，在齿轮箱的下部用字典垫高。另外，天平的盘子是凹形的，故用干电池填在臂杆的下方。

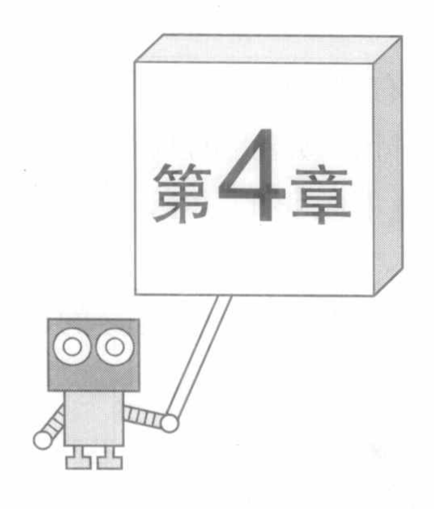

减速比441：1

用手把齿轮箱按压结实，合上开关。读出臂杆按押天秤时的数值。

转矩=力×臂长。用减速比为441：1的齿轮箱测定时，天平上的值为440g，所以力矩=440g×10cm=4400g·cm。用减速比为126：1的齿轮箱测定时，天平上的值为270g，故转矩=270g×10cm=2700g·cm。


减速比126：1

装置非常简单。最后要说明的是，此次测定的转矩为停转转矩，和转动中的转矩还是有区别的。从2个实验结果可以看出，齿轮比越大，其转矩也就越大。



直线前进、后退和转弯

——2个电机——

在第3章中，由于使身体倾斜，把重心移到了单脚上，从而能使向前迈步的脚抬起前进，向后迈步的脚抬起后退。在第4章中，将使机器人成长为不仅能直线前进，还能左右转弯的双足步行机器人。当然，低成本、简单这一宗旨是不变的，所以要在不追加电机的情况实现上述目标。在基本构造上，原封不动地使用在第3章中制作的双足步行机器人。

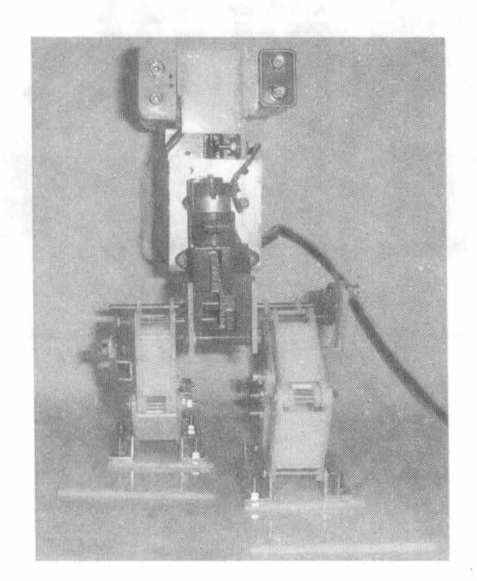
4.1 重心移动使转弯变为可能

首先，让我们再次让在第3章中制作的双足步行机器人动作起来。让它进行各种动作后可以看出：它似乎能够转弯。

从左脚在前的状态开始，如果使它的上身向左倾斜、右脚向前迈步，就可以直线前进了。使上身向左倾斜是为了把重心移到左脚上，保持右脚悬起的状态。

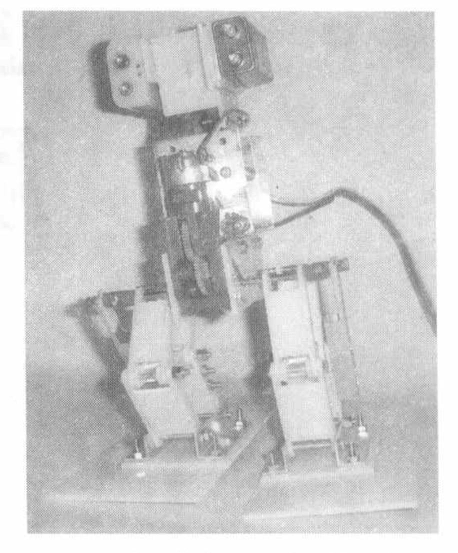
在这里，大胆地做一做与此种状态相反的：在上身不倾斜的状态下，使右脚向前迈步，将会怎样呢？

如图4.1所示，身体向右倾斜着稍微向右转弯了。这是在第1章中实验的



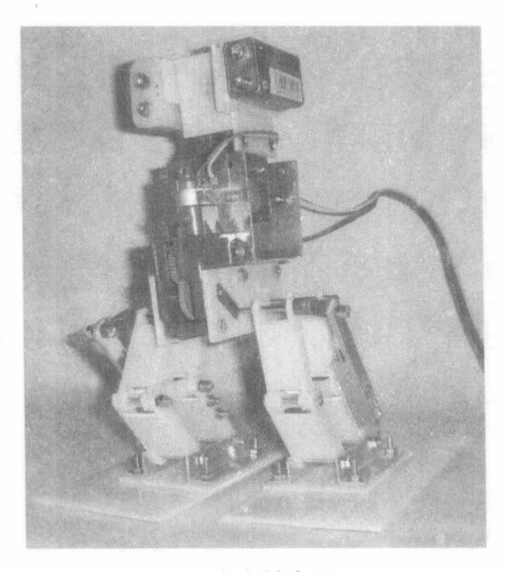
(a)左脚在前，上身不倾斜





(b)上身不倾斜，右脚向前迈步





(c)向右转弯了

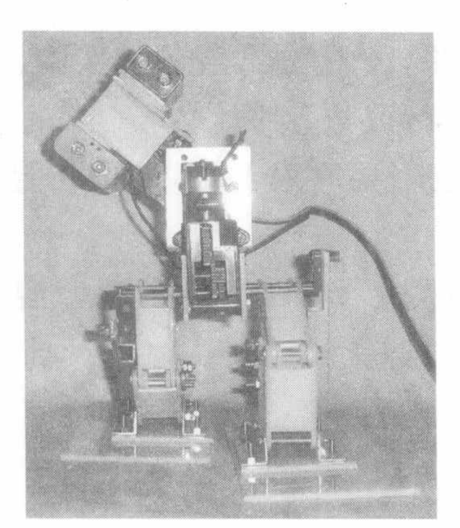
图4.1 上身不倾斜的转弯

样子！在第1章中制作的双足步行机器人，由于重心没有移动，一步向左一步向右地向前步行。由于目标是让它直线行走，因此在第2章中进行了改善，使重心放在了一只脚上，可以让脚抬起。但是从转弯的角度考虑，还是在第1章中体验过的左右转动的现象可以利用。

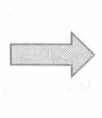
也就是说，在上身不倾斜的情况下，使脚向前迈步时，由于重心没有加到一只脚，想向上抬起的脚不能悬起，在重力的作用下又着地了，使身体向那个方向倾斜，结果身体向想要抬脚的那一方转弯了。

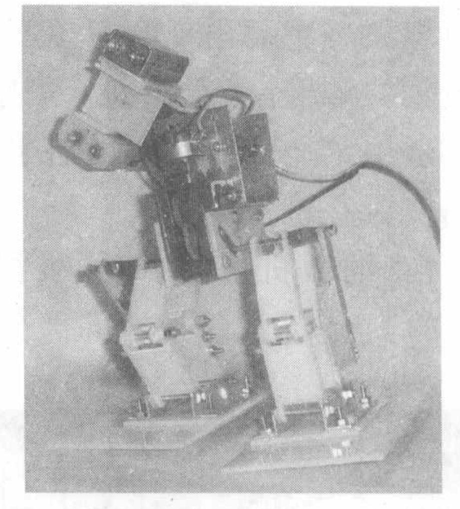
在第3章中的双足步行机器人的重心是可以控制的：直进时，使上身倾斜，把一只脚悬起；转弯时，用身体不倾斜进行控制。这样不就可以对直线前进和转弯都进行控制了吗？再进一步，如果把重心移到要抬起的那只脚上会是怎样？做做看。

如图4.2所示，使左脚处于向前迈出的状态。直线前进时，身体是向左倾



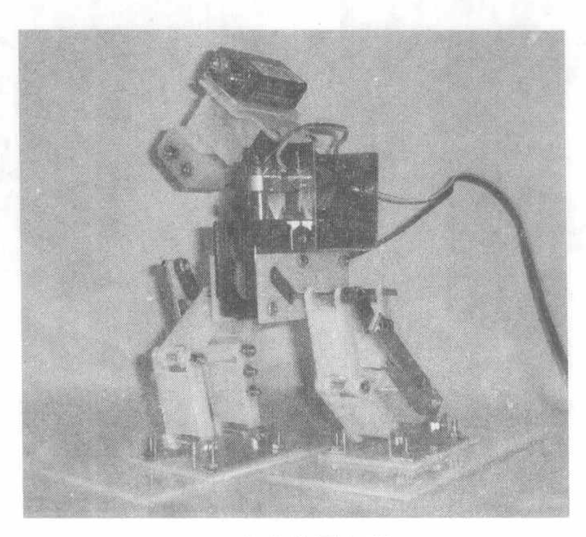
(a)重心向右倾斜





(b)在重心向右倾斜的情况下向前迈右脚





(c)向右转了大弯

图4.2 在重心向右倾斜的状态下转弯

斜的。此时相反，让它向右倾斜，并且使右脚向前迈出。转了一个比刚才还要大的弯！我们发现转弯的方法了。仔细观察一下机器人转弯的样子，要是改变一下脚底板的形状的话，将会转更大的弯。

我们着重看一下机器人脚底板接地时样子。图4.3(a)是前进右转弯的时候，由于身体向右倾斜，所以转了弯。如果把脚底板的右后部切掉将会怎样呢？机器人不就会倾斜更大、转弯更大了吗？

同样，后退右转弯时，如果把脚底板的左后部切掉，也会倾斜更大、转弯更大，如图4.3(b)所示。

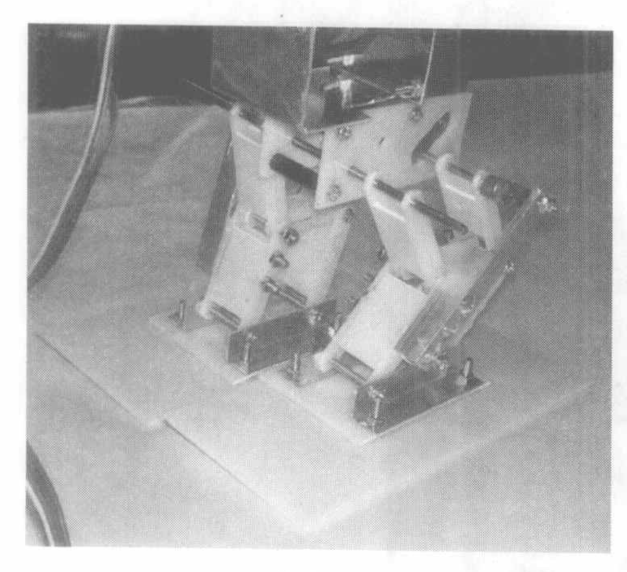
当然，切掉的部分不能影响直线前进。

那么，规定切掉脚底板的方法吧。在脚面上用螺钉固定着板子，脚底板只是用双面胶贴在板子上的，很容易拆下来。按自己喜欢的形状切割，用各种形状进行实验是很令人愉快的。

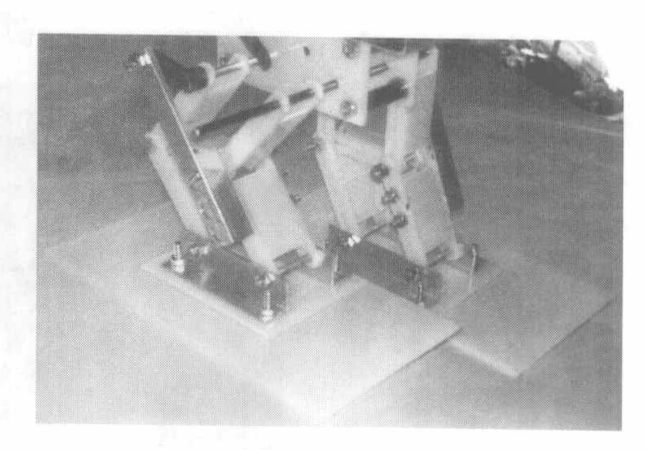
一边想象着将要出现的意想不到的结果，一边尝试着各种实验。如果没有出现预想的结果，就要分析一下原因并进行改进。

笔者是决定切掉脚底板的后半部。但也不要局限于此，要根据自己想要的转弯角度大小进行调节。

在第5章的微机控制中，如果把脚底板的后半部切掉，后退时容易倒下（惯性力的影响）；如果切掉的部分较小，则不受影响。



(a)前进右转弯



(b)后退右转弯

图4.3 脚底的观察

4.2 脚的加工

把用双面胶粘上的左、右脚底板拆下来。然后，左、右脚分别按图4.4的尺寸进行切割，虚线部分是切去的部分。切割时使用塑料切断刀。

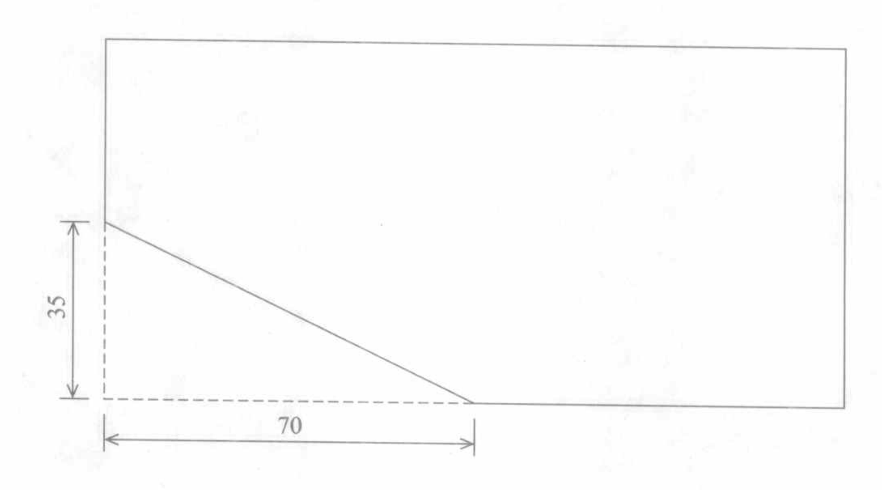


图4.4 转弯型脚底板的加工尺寸

切掉以后，用双面胶带粘到固定在脚面的板子上，如图4.5所示。

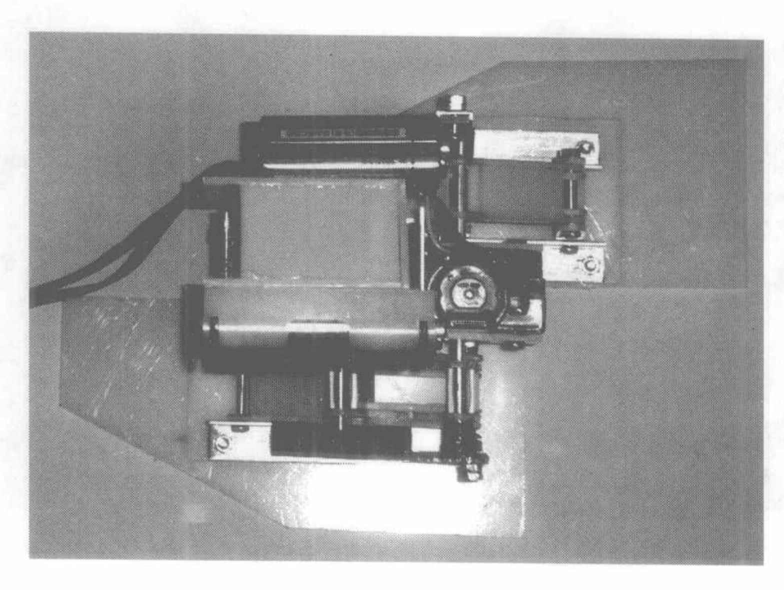


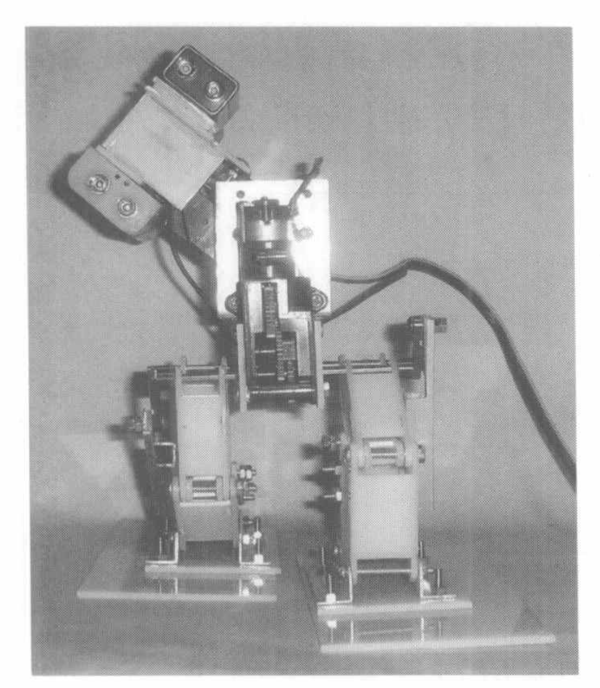
图4.5 用双面胶带安装脚底板

4.3 转弯实验

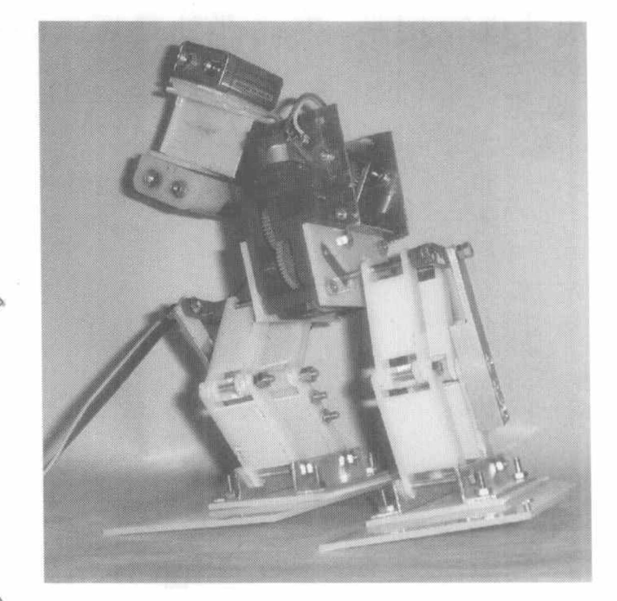
现在，进行转弯的双足步行实验吧。从前进的步行开始。

如图4.6所示，左脚在前的状态下，使重心向右倾斜，右脚向前迈步，再

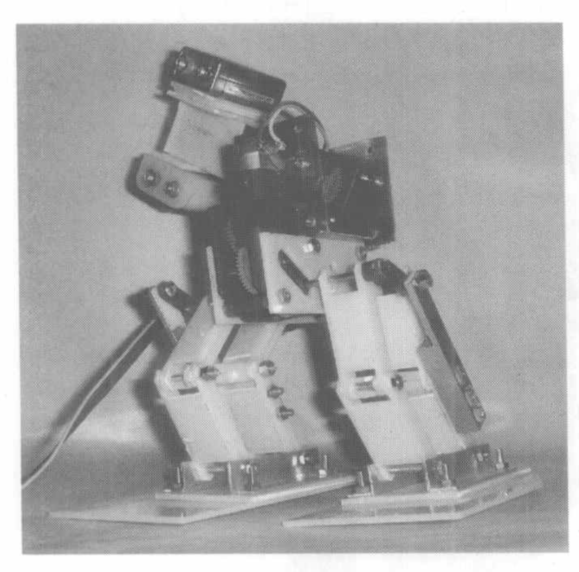
使身体大幅度倾斜的同时，向右转弯了。



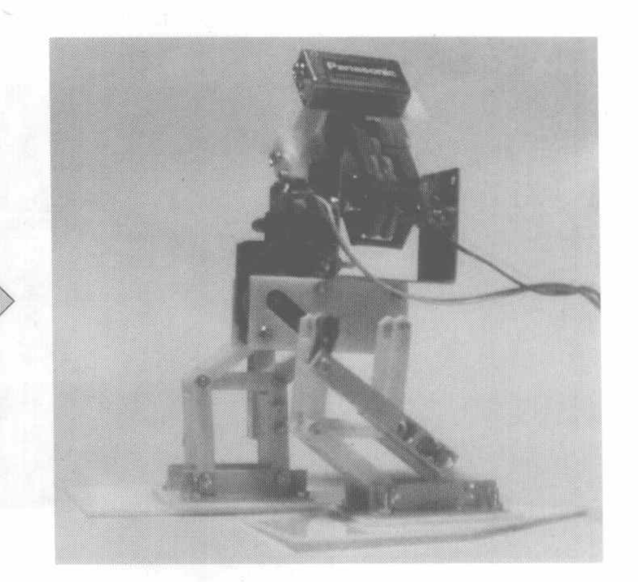
(a)左脚在前，重心向右倾斜



(b)使身体向右大幅度倾斜



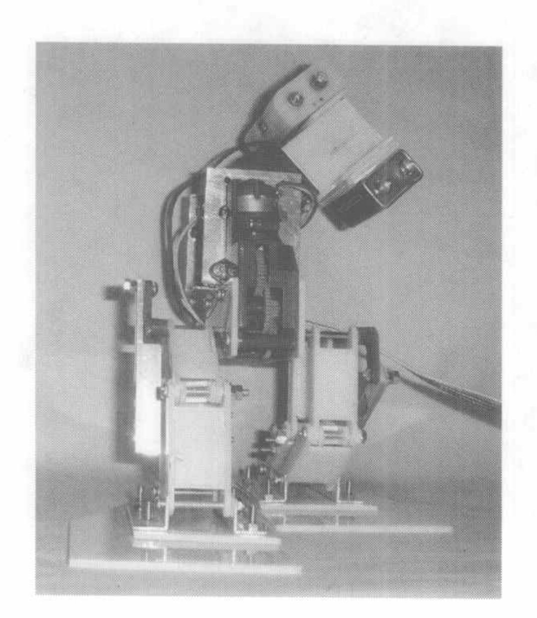
(c)正在转弯



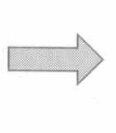
(d)向右转弯结束

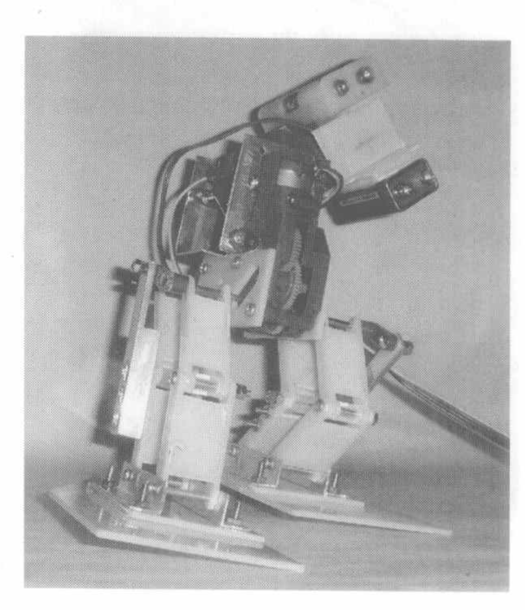
图4.6 使用了重心倾斜的右转弯（从左脚在前开始）

如图4.7所示，右脚在前的状态下，把重心向左倾斜，左脚向前迈步，再使身体向左倾斜的同时，向左转弯了。此转弯角度并不像右转弯的那样大，但把重心的倾斜加大后，转弯角度也会变大。



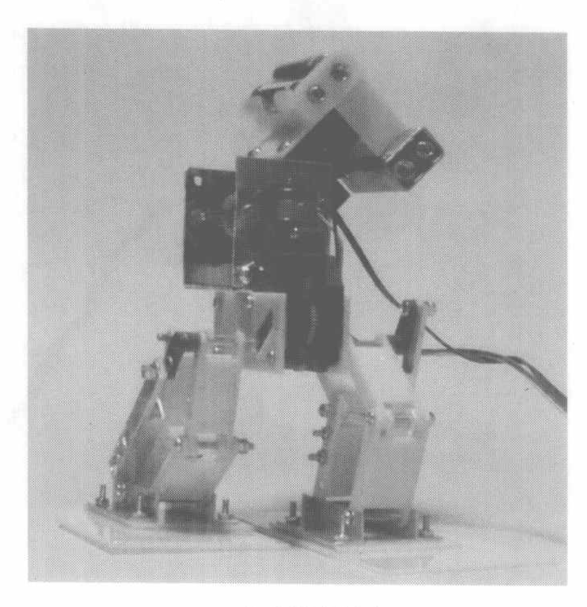
(a)右脚在前，重心向左倾斜





(b)使身体向左大幅度倾斜

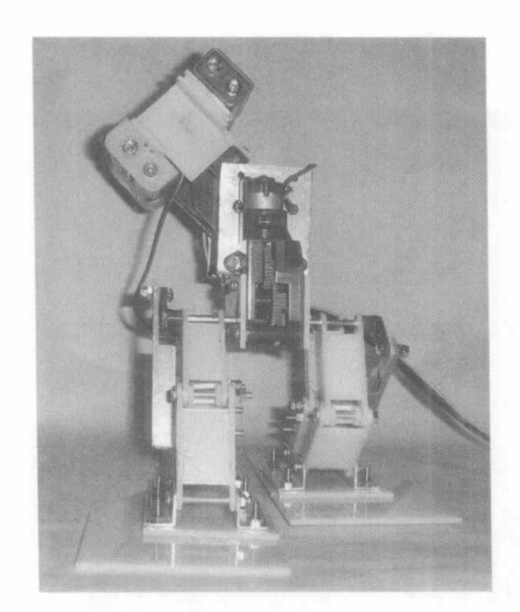




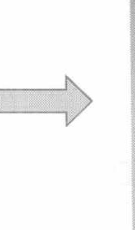
(c)向左转弯结束

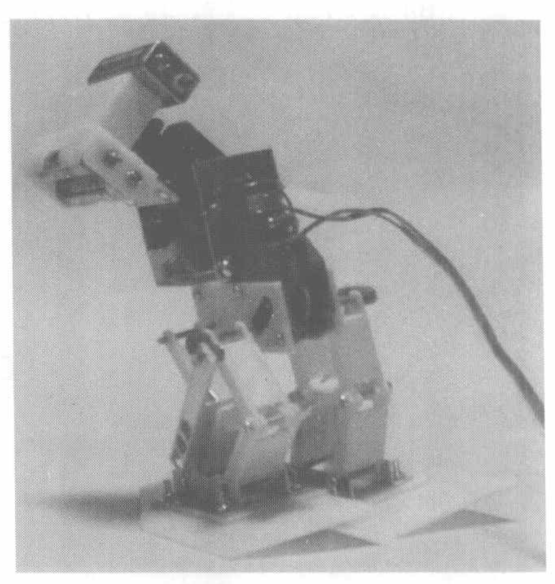
图4.7 在重心向左倾斜的状态下左转弯（从右脚在前开始）

接下来是后退。如图4.8所示，左脚在后，把重心向右倾斜，右脚向后移动，身体向右倾斜的同时向右转弯了。



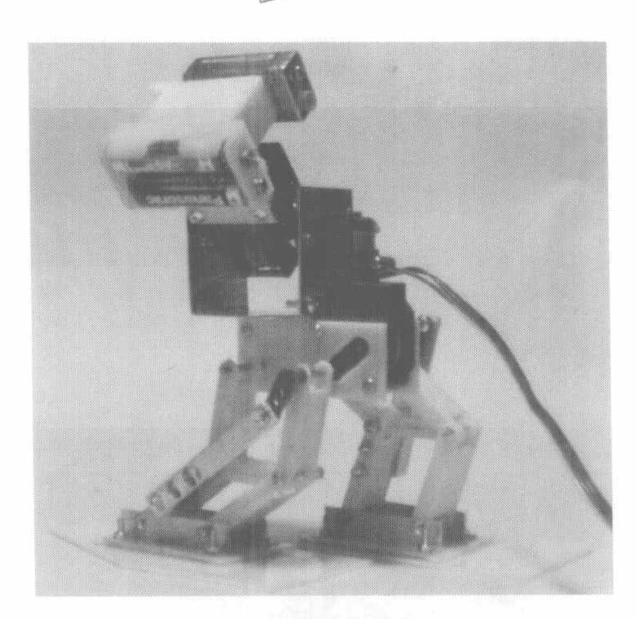
(a)左脚在后，重心向右倾斜





(b)使右脚向后移动

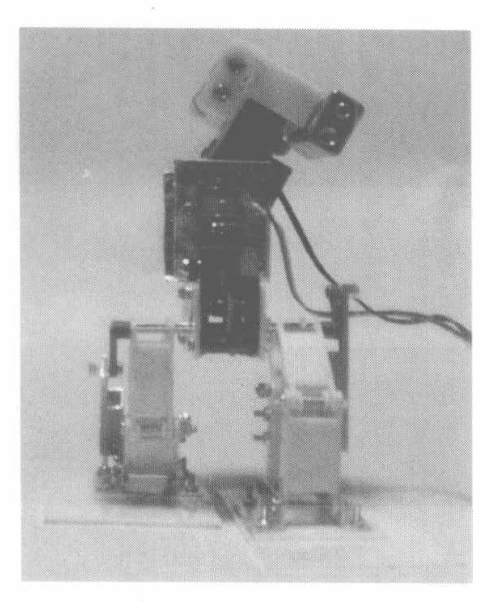




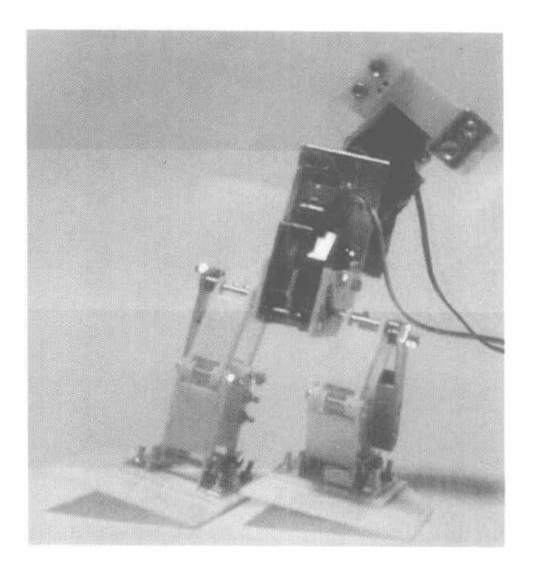
(c)向右转弯结束

图4.8 使用了重心倾斜的右转弯（从左脚在后开始）

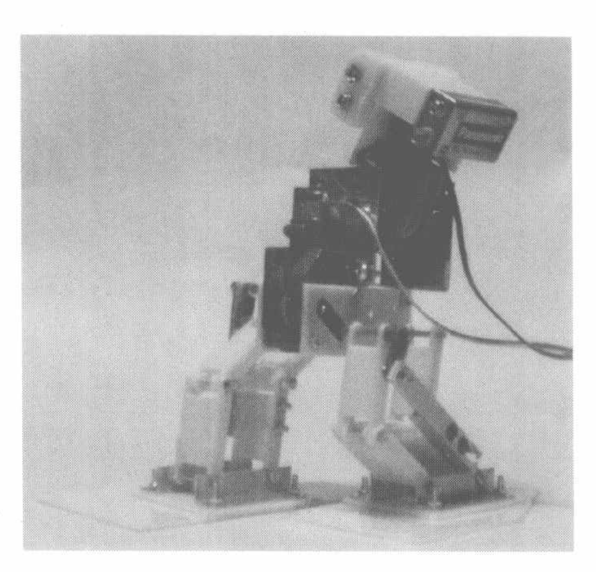
如图4.9所示，右脚在后，使重心向左倾斜，左脚向后移动，再使身体向左倾斜的同时，向左转弯了。



(a)右脚在后，重心向左倾斜



(b)使左脚向后移动

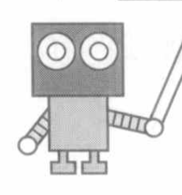


(c)向左转弯结束

图4.9 边后退边向右转弯（从右脚在后开始）

无论前进还是后退，都可以进行转弯了。到此，机器人已成长为可以直线前进步行、直线后退步行、前进左转弯、前进右转弯、后退左转弯、后退右转弯的双足步行机器人了。

第5章



用微机自动控制

到第4章，双足步行机器人不仅能直线前进和后退，也可以往左、右方向转弯了。每次进行前进、后退和转弯的切换时，都是由和机器人相连接的开关进行的。

在第5章里，终于搭载微机了。由安装的传感器，一边判断着现在的姿势，一边双足步行，成长为能按程序自动控制的双足步行机器人。

5.1 微机的作用

5.1.1 用微机控制

微机就是小型电脑。提起电脑，马上联想到放在桌子上的电脑。不过，微机的使用范围相当广，在很多看不到的地方也被大量使用着，比如微波炉里、电视里、空调机里、汽车里、工厂里的机器中……等等。

微机能做什么？根据开关和传感器的输入信号，执行被预先编入的程序，输出使电机转动、鸣笛、使电灯发光这样的信号。我们把这种微机所做的工作叫做控制。

图5.1就是本书的双足步行机器人的微机控制。

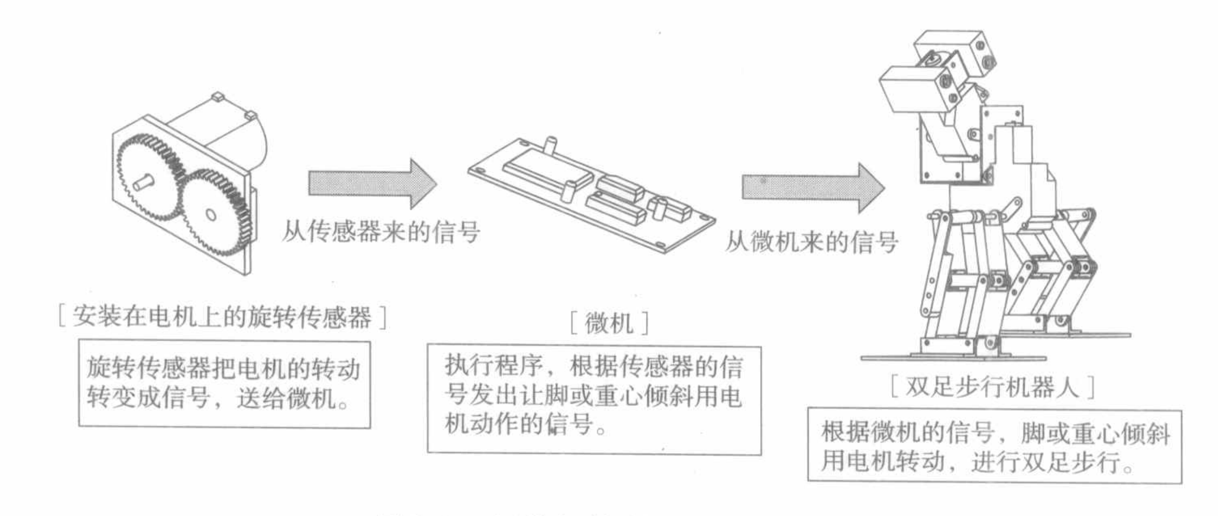


图5.1 用微机控制双足步行机器人

5.1.2 控制电机的转动

控制电机的转动时，信号为流程如图5.2所示。

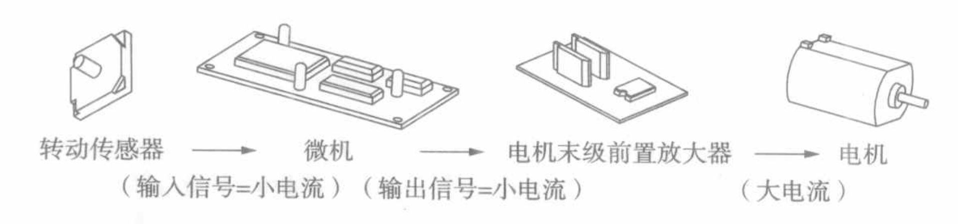


图5.2 电机和微机之间需要电机末级前置放大器

由微机传来的输出信号，不能直接转动电机。这不光是电压不一致，从

微机输出的电流太小，不能转动电机。

因此，需要电机末级前置放大器这种电路，将从微机来的输出信号变成大的电流，供给电机。

5.1.3 用传感器检测电机的转动位置

为了知道电机的转动位置而设置的传感器称为旋转传感器。

本书中在廉价的齿轮箱上安装旋转传感器，如图5.3所示，其原理与伺服电机相同。

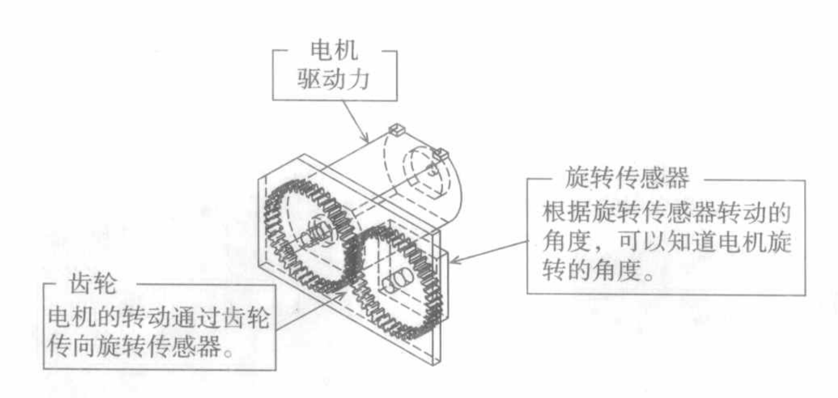


图5.3 自制伺服电机的结构原理

5.1.4 对脚部电机和重心倾斜电机的控制

如第1章～第3章的实验一样，为了使双足步行机器人步行时向前迈出的脚能悬起来，关键是把重心移到一只脚上。

例如，为了使左脚悬起，要把重心向右侧倾斜，其控制过程如图5.4所示。

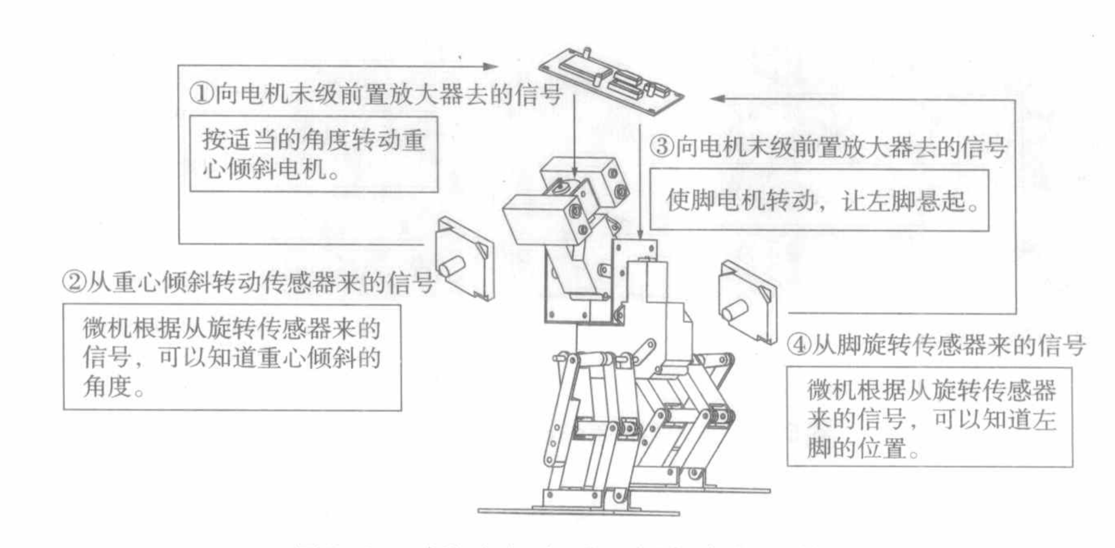


图5.4 对脚电机和重心倾斜电机的控制

5.2 微机的搭载

5.2.1 微机的选定

微机种类很多，性能各异，虽然很多登在商品目录（简介）上，但实际上却很难买到。因此，选定微机时最重要的是看能否买到。图5.5、图5.6所示的PIC微机和H8微机，很容易在秋叶原电器店及网上买到。

［PIC微机］
① 品名 PIC16F88-I/P
② 价格 230日元
③ I/O端口数 15（其他输入1）
④ 其他 AD转换器，定时器，串行通信
⑤ 写入程序 需要专用的写入程序

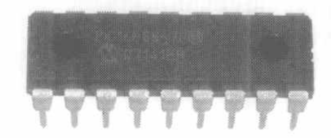


图5.5 PIC16F88

［H8微机］
① 品名 AKI-H8/3694F
② 价格 1650日元
③ I/O端口数 29（其他输入8）
④ 其他 AD转换器，定时器 串行通信
⑤ 写入程序 内设写入程序

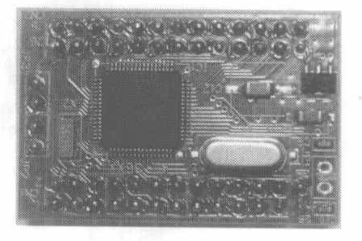
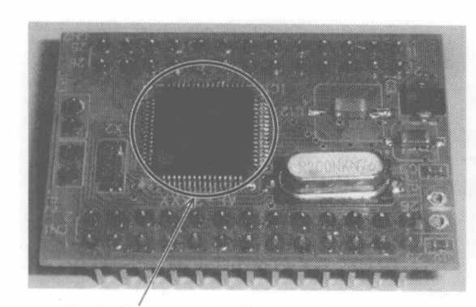


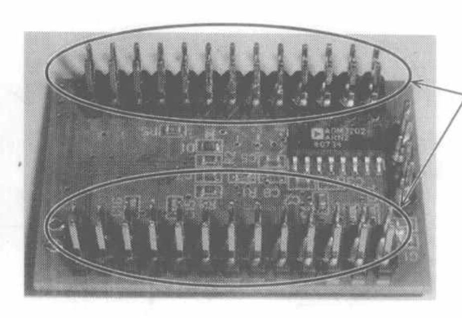
图5.6 H8/3694F

5.2.2 使用H8微机

本书用于双足步行机器控制的微机选定为H8微机中的AK1-H8/3694F，如图5.7所示。



(a)正面



(b)背面

图5.7 AKI-H8/3694F微机的外形

在本书的双足步行机器人中，不光要对机器人的单体进行控制，当电脑

和双足步行机器人进行电子通信的同时也要能进行控制。H8微机只要与电脑连接上，便能写入软件，非常方便。

另外，H8微机的I/O端口数较多，以后增加传感器和电机也很方便。

5.3 电机末端前置放大器和旋转传感器的设计

5.3.1 电机末端前置放大器的设计

由微机传来的信号可以使电机转动或停止，但此信号的电流较小，不能直接使电机转动，所以必须在微机和电机之间加入电机末端前置放大器。

电机末端前置放大器根据从微机来的信号，使大电流流向电机，从而能使电机正转、反转或停止。让电机正转及反转时，还必须要切换电池的+、-极。每次都切换+、-极是很麻烦的，因此考虑使用电路进行+、-极的切换。具有代表性的是称为“H电桥”的电路，其原理可以用图5.8的开关动作来理解。

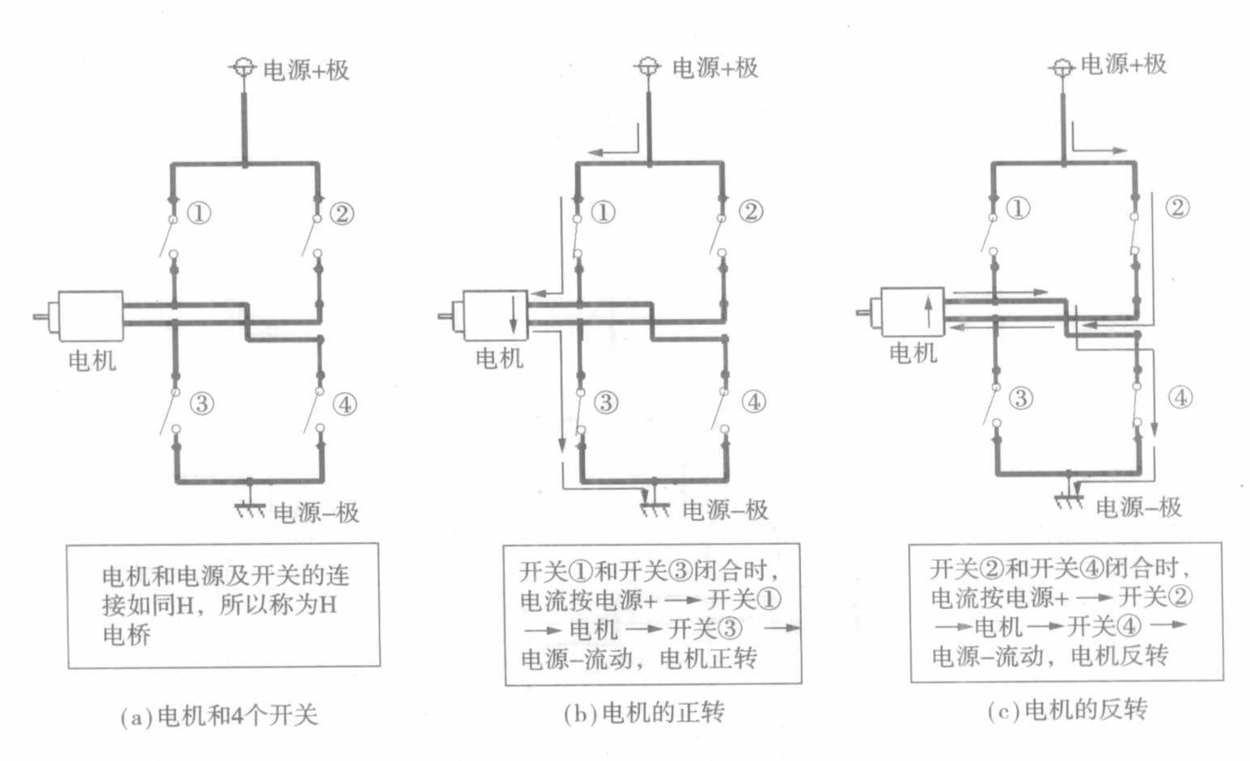


图5.8 H电桥电路的原理

实际的H电桥电路是没有开关的，而是使用了和开关具有相同作用的FET半导体元件，如图5.9所示。它有被称为控制极、漏极、源极的3个端子，

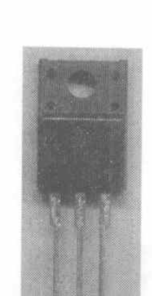




图5.9　FET

在控制极上加上电压时，从漏极可以向源极流入大的电流。由于控制极的电压作用，漏极和源极之间具有开关的作用。

本书中制作的电机末端前置放大器，就是用FET代替图5.8中的开关。使用了FET的H电桥电路如图5.10和图5.11所示，FET①～④代替了图5.8中的开关①～④。

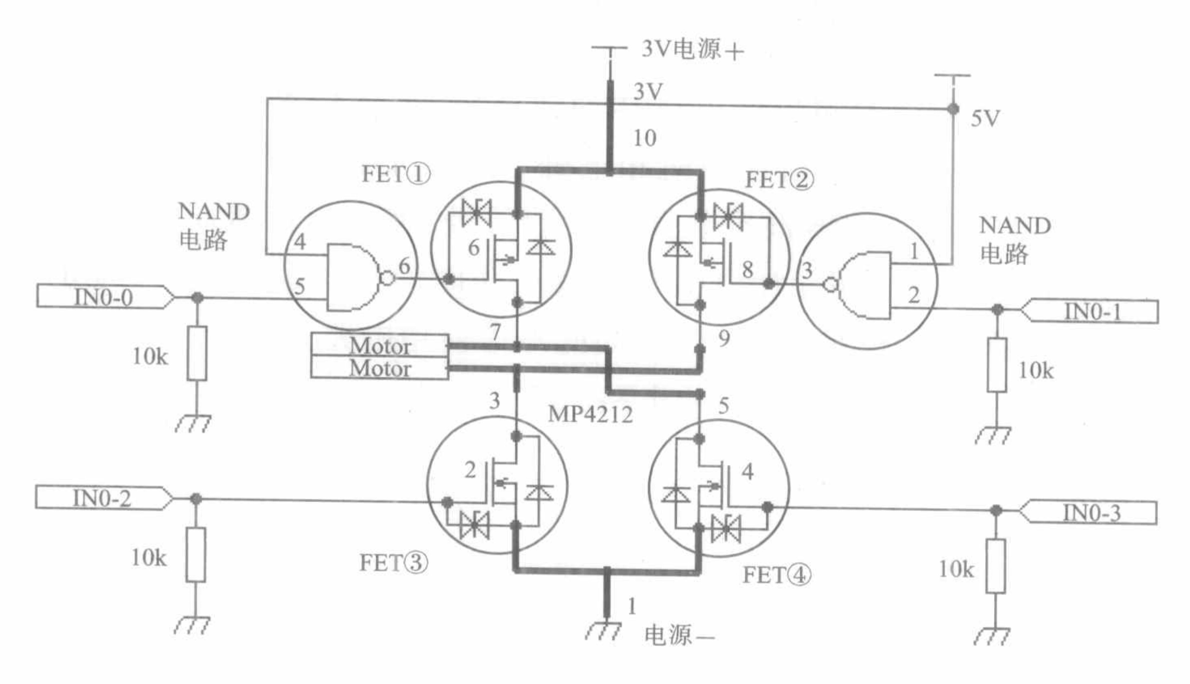


图5.10　脚电机用电机末端前置放大器电路图

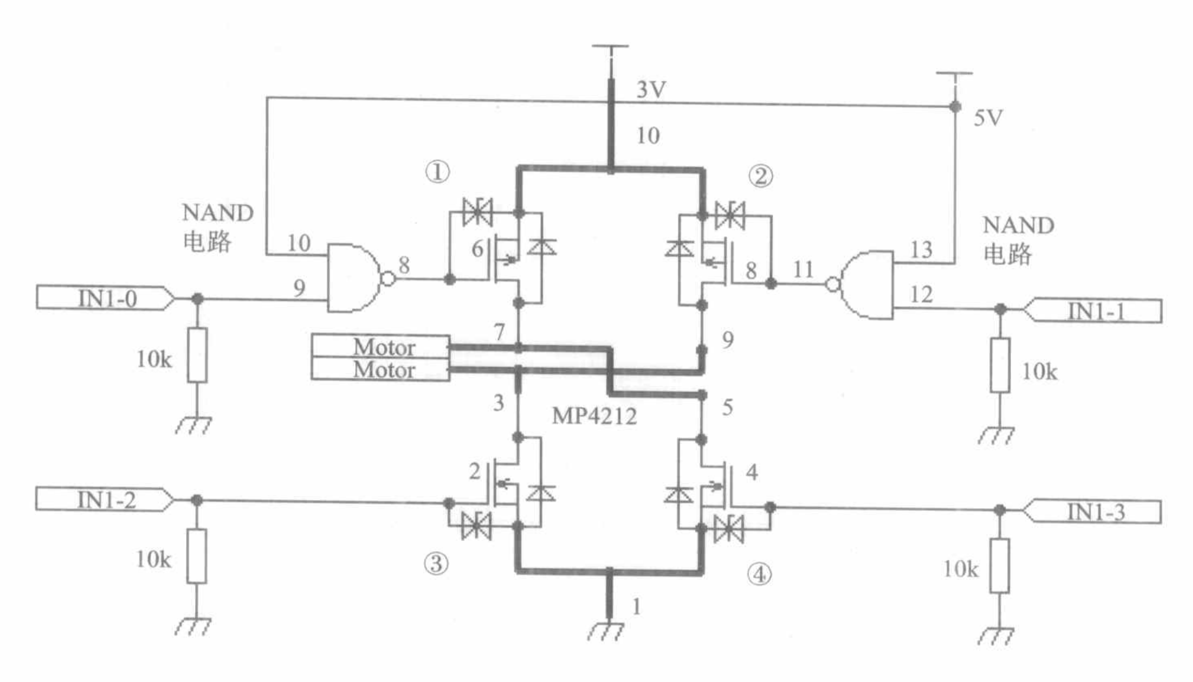


图5.11　重心倾斜用电机末端前置放大器电路图

电机正转时，从微机来的信号把FET①和FET③闭合、FET②和FET④断开，电流的流向为3V电源+→FET①→电机→FET③→电源-。

电机反转时，从微机来的信号使FET②和FET④闭合、FET①和FET③断开，电流的流向为3V电源+→FET②→电机→FET④→电源-。

另外，从微机来的信号只有“1”和“0”2种。本书中使微机动作的电压为5V，故信号为“1”时，电压为5V；信号为“0”时，电压为“0”V。

FET有N沟道型和P沟道型。在图5.10和图5.11中，FET①和FET②是P沟道型，FET③和FET④为N沟道的FET。当加在控制极上的信号为“0”(0V)时，P沟道的FET①和FET②闭合(ON)；当加在控制极上的信号为“1”(5V)时，N沟道的FET③和FET④闭合(ON)。

图5.10和图5.11中，有 这样的记号，称为NAND电路。NAND电路的输入信号和输出信号的关系如图5.12所示。

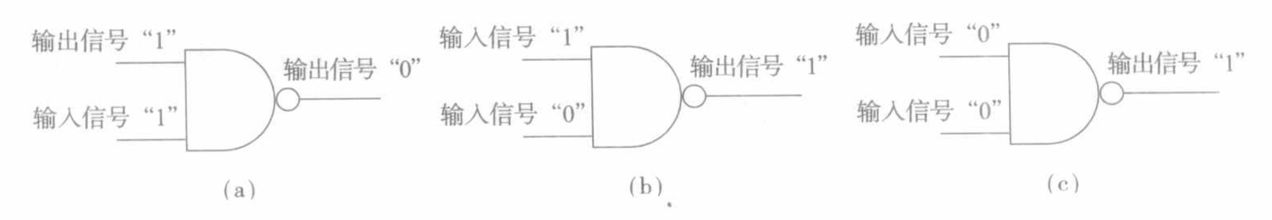


图5.12 NAND电路的输入信号和输出信号的关系

①输入的两个信号都为“1”(5V)时，NAND的输出信号为“0”(0V)。

②一个输入信号为“1”(5V)、另一输入信号为“0”(0V)时，NAND的输出信号为“1”(5V)。

③输入的两个信号都为“0”(0V)时，NAND的输出信号为“1”(5V)。

也就是说，只有当两个输入信号都为“1”(5V)时，NAND的输出信号才为“0”(0V)，图5.11和图5.12中，NAND电路的1个输入连接着5V。另外，NAND电路的输出和FET①(P沟道)、FET②的控制极相连简化后如图5.13所示。要使FET①(P沟道)和FET②(P沟道)闭合(ON)的话，可在控制极加上“0”信号，所以只要微机输出的信号为“1”就可以了；FET③和FET④为N沟道FET，当从微机来的信号为“1”时闭合(ON)。在图5.10中，从微机来的信号与电机正、反转的关系见表5.1。

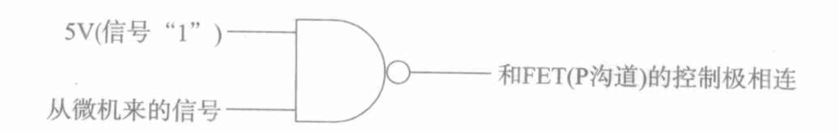


图5.13 在图5.10和图5.11中使用的NAND电路

表5.1 从微机来的信号IN0-0~IN0-3和电机的转动

状态	IN0-0	IN0-1	IN0-2	IN0-3	FET①	FET②	FET③	FET④
正　转	1	0	1	0	0	1	1	0
反　转	0	1	0	1	1	0	0	1
制动器	0	0	1	1	1	1	1	1
停　止	0	0	0	0	1	1	0	0
禁止1	1	*	*	1	0	*	*	1
禁止2	*	1	1	*	*	0	1	*
禁止3	1	1	1	1	0	0	1	1

*表示信号“1”、“0”可任选。

禁止1状态下，FET①和FET④闭合（ON），电流从电源+极流向电源−极，没有通过电机，即处于短路状态，这是非常危险的。

禁止2状态下，FET②和FET③闭合（ON），和禁止1一样，电流从电源+极流向−极，也没有通过电机，处于短路状态，非常危险。

禁止3也相同。编写程序时，一定要注意禁止使用禁止1～禁止3状态。

表5.1是编写电机转动程序的重要数据。

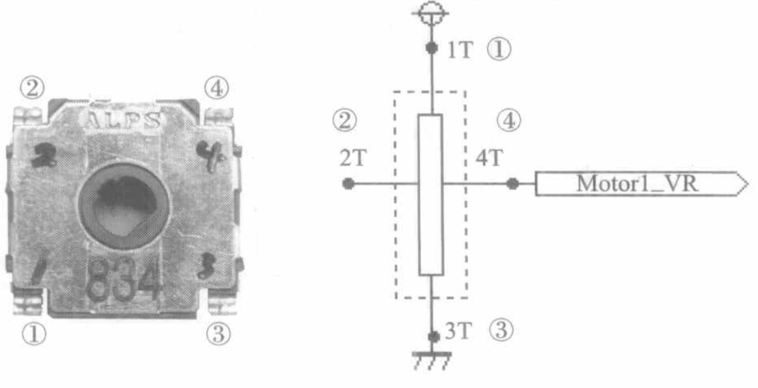
5.3.2 旋转传感器的设计

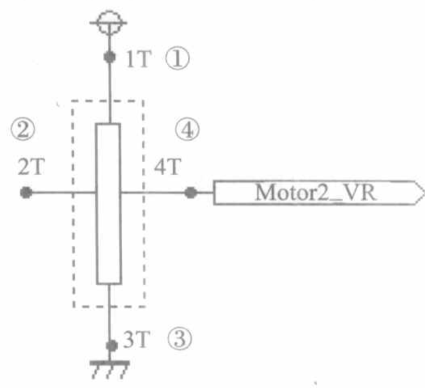
5.1.3对伺服电机进行了说明，其使用的检测转动的传感器就是将要设计的旋转传感器。这里选用ALPS制电阻式传感器RDC803001A，如图5.14（a）所示。

旋转传感器的电路如图5.14(b)和(c)所示，端子①与5V电源相连，端子③与GND相连，端子④与微机的传感器信号输入端子相连。

像5.1.3中对伺服电机的说明那样，旋转传感器通过齿轮与电机联动而旋转，旋转时，其电阻值是变化的；与此相对应，其输出的电压也是变化的。







(a)RDC 803001A端子号 (b)脚电机的旋转传感器 (c)重心倾斜电机的旋转传感器

图5.14 旋转传感器

旋转传感器输出电压的变化原理是欧姆定律。

欧姆定律：电压=电阻×电流

5.4 旋转传感器扩展线路板、电机末级前置放大器的制作

需增加的零件见表5.2。

表5.2 增加的零件

零件名	规　格	数量	购买地点	单价/日元
微机	AK1-H8/3694F	1	秋月电子通商	1650
单面万能板	C型，72mm×47mm	3	秋月电子通商	70
电线	10芯,15列 0.12mm,3m	1	千石电商	70
电阻式旋转传感器	RDC803001A (ACPS)	2	chip one stop	572
IC插头	14针	1	秋月电子通商	50
IC	74HC00	1	秋月电子通商	50
FET模块	MP4212	2	maruthu零件馆	598
陶瓷电容器	0.1μF	4	秋月电子通商	100
1/4W电阻	10kΩ	8	千石电商	5
1/4W电阻	390Ω	2	千石电商	5
LED (兰)	2V,10mA左右	1	铃商	10
LED (红)	2V,10mA左右	1	铃商	10
针型插座	40P (20×2)	2	秋月电子通商	80

续表5.2

零件名	规　格	数量	购买地点	单价/日元
针型插头	40P（20×2）	2	秋月电子通商	
电源IC（3端子稳压器5V/A）	TA4805S	1	秋月电子通商	100
3.5mm立体小插头（带电线）	1.8m	1	秋月电子通商	210
开关	线路板用扳扭开关，3P	1	秋月电子通商	80
拨动开关	2电路，2接点	1	铃商	30
立体小插孔	ϕ3.5（线路板用）	1	铃商	100
电池揿钮	纵型或横型	1	秋月电子通商	10
焊锡	电子零件用（ϕ0.6mm左右）	1	商店	1029
热收缩套管	SS	1	模型店	158
平齿轮	42齿×3mm，0.5模数	2	模型店	231
D辅助连接器外壳	9P	1	秋月电子通商	50
D辅助连接器	9P母（焊接类型）	1	秋月电子通商	50
M3螺丝	M3×30	2	商店	5
M3螺丝	M3×6	10	商店	5
M3螺丝	M3×12	2	商店	5
M3螺母	M3	14	商店	5
M4长螺丝	长100mm以上	1	商店	100
M4螺母	M4	8	商店	5
支撑柱	10mm套件	1	秋月电子通商	100
垫片	M3	4	商店	5

5.4.1　焊接方法

电子零件怕热，多易损坏，所以制作时应充分注意。现在说明一下焊接的窍门。

①绝对不要加热过度。零件过热时容易损坏。如果焊接技术不高、多次重焊，零件就容易因过热而损坏。故焊接失败时，不要马上重新再焊，要等充分冷却后再重新开始。

②把烙铁轻轻地与将要焊接的零件和基板接触，稍稍加热后焊锡便熔化。焊锡熔化后，使烙铁离开零件。

③图5.15、图5.16是在零件上焊电线时的顺序。先把零件焊在线路板上，然后在电线上涂上熔化的锡，再用烙铁与电线接触，一边熔化电线上的锡，一边与焊在线路板上的零件的焊锡部接触，使两部分的焊锡熔在一起。

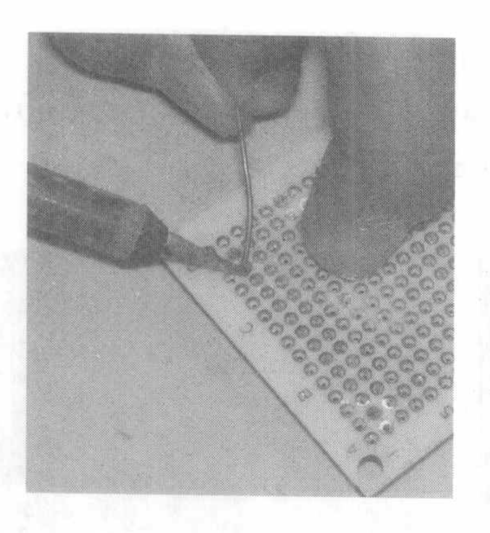


图5.15 加热熔化焊锡

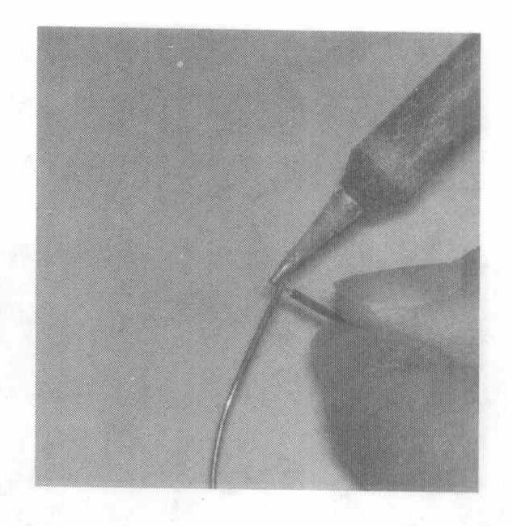


图5.16 在电线上涂焊锡

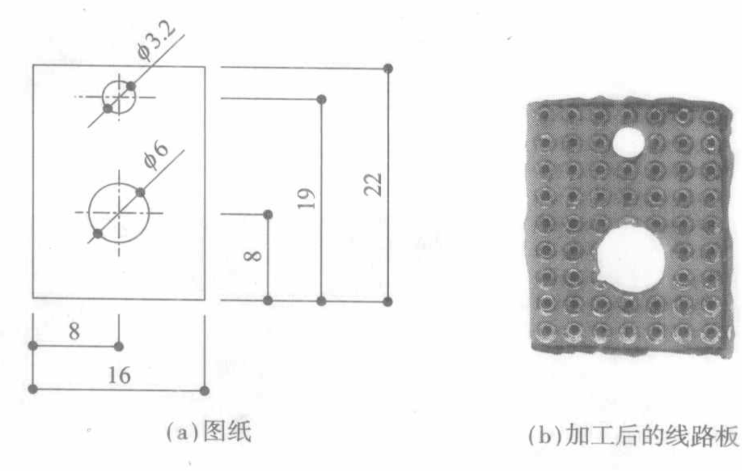
④像MP4212或电源用IC一样，在引脚较粗的零件上焊电线时，烙铁上也要涂上少许的锡，焊接方法与③相同。

5.4.2 旋转传感器的制作

本节制作旋转传感器，数量：2个。

1.加工安装电阻式传感器RDC803001A的线路板

按图5.17的图纸尺寸，用电钻在万能板上打孔，再用钢锯锯断。进行打孔和锯断作业时，都要把线路板在虎钳上固定结实。



(a)图纸　　(b)加工后的线路板

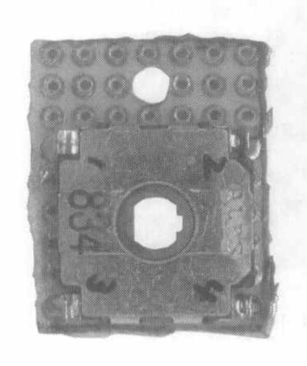
图5.17 RDC803001A安装用线路板

在RDC803001A的背面，有安装用的凸状物，但对于焊接来说是无用的，所以要用剪钳剪断。

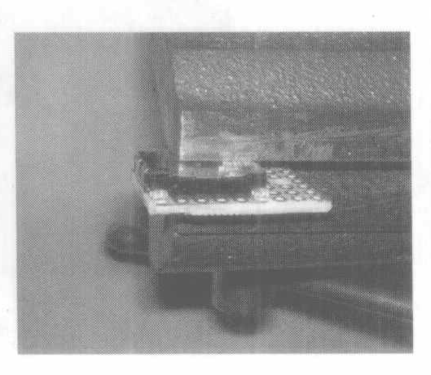
像图5.18所示的那样，把RDC803001A焊在加工好的线路板上，把4个

端子焊在线路板上。焊接时，要注意端子号的位置关系。

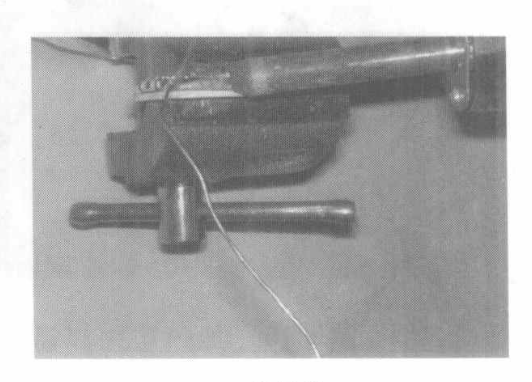
焊接时，要用虎钳固定结实。焊接后，线路板上的孔要和RDC803001A的孔对齐。用烙铁把RDC803001A的4个端子焊接在线路板上。



(a)注意端子号的位置



(b)固定在虎钳上



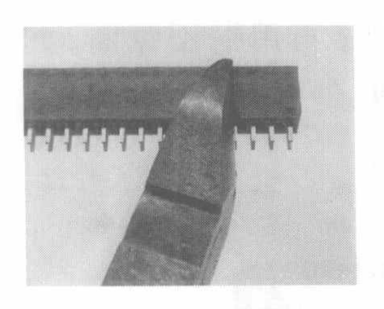
(c)放烙铁

图5.18 RDC803001A的焊接固定

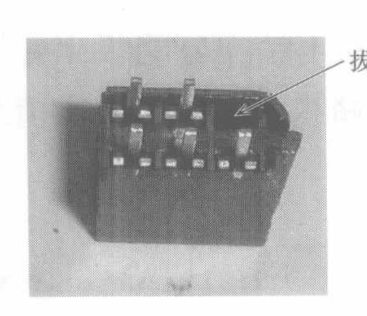
2.制作旋转传感器连接用的连接器

数量：2个。

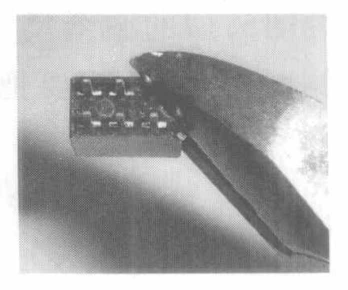
首先，用剪钳把2×20的针型插座剪成2×3的针型插座，拔掉1根针，再将拔掉针的地方用剪钳剪去，用针锦锉锉去毛刺。如图5.19所示。



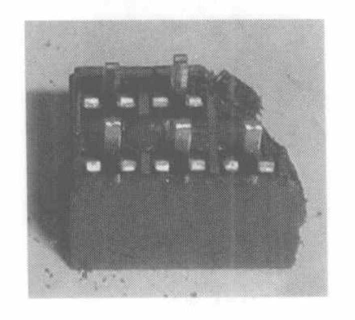
(a)剪断针型插座



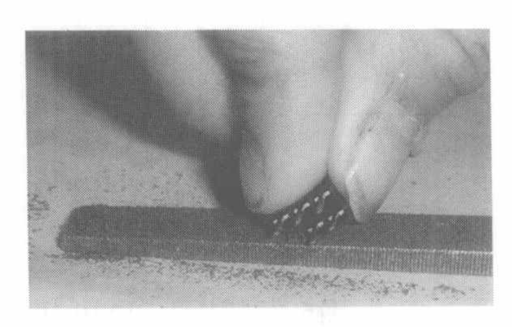
(b)拔去1根针



(c)用剪钳剪去一角



(d)剪掉后的形状



(e)用什锦锉去毛刺

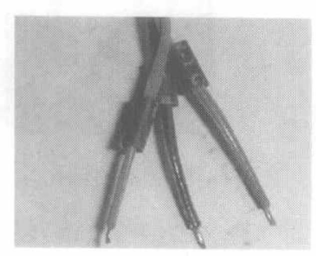
图5.19 针型插座的加工

3.把电线焊接在制作的接头上

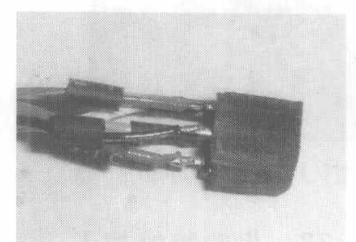
首先准备一束（5根）30cm长的电线，将电线的两端分别剥去2mm长的

皮，涂上焊锡。在针型插座的5根针上也涂上焊锡。再准备5根5mm长的热收缩管。

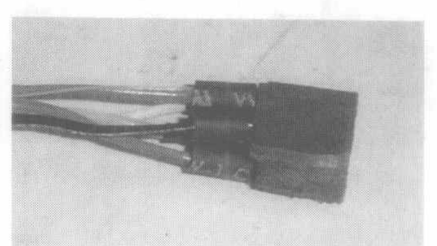
把电线的一端焊在接头上。在焊接前，把热收缩管套在电线上，如图5.20（a）所示。焊接后的样子如图5.20（b）和（c）所示。再按图5.20（d）所示，用电吹风吹热风，使热缩管紧贴在焊接处，如图5.20（e）所示。



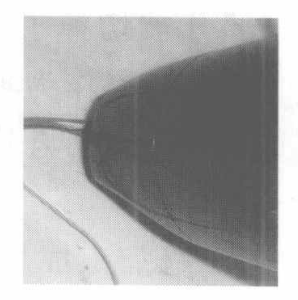
(a)把管子穿过电线



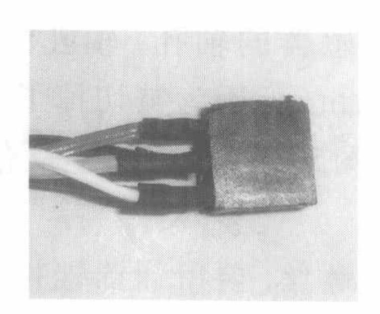
(b)焊在接头上



(c)焊接后的样子



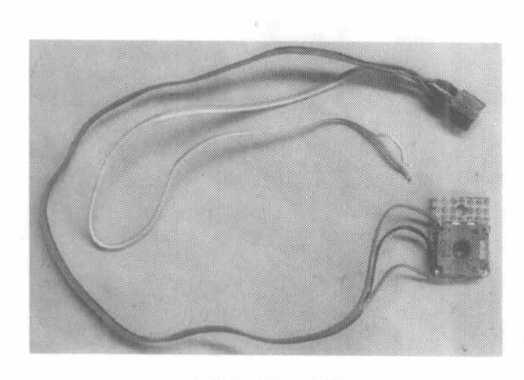
(d)用电吹风吹热风



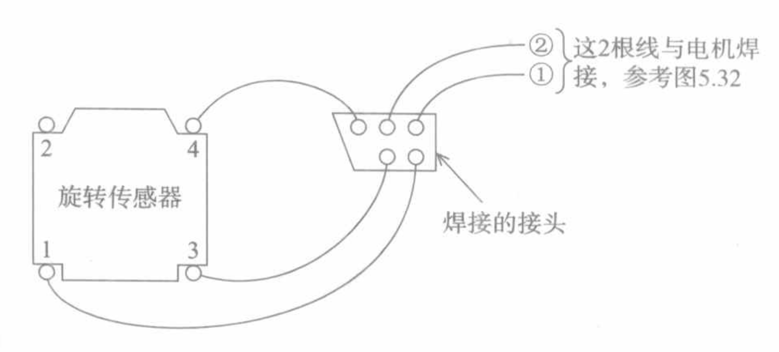
(e)热缩管收缩后完成

图5.20 在接头上焊电线

如图5.21（a）所示，把电线的另一端焊接到传感器上。参考图5.21（b），把从接头来的电线正确地焊接到旋转传感器的端子上。



(a)焊接到传感器上



(b)传感器和接头的配线图

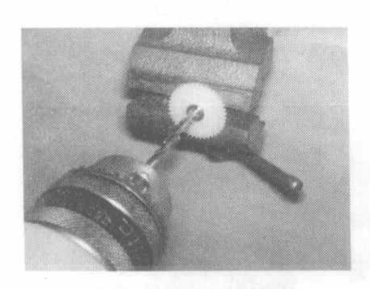
图5.21 传感器和接头的焊接

4.在齿轮箱上安装旋转传感器

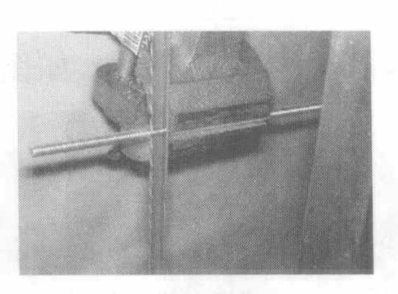
如图5.22(a)所示，把平齿轮（42齿×3mm，0.5模数）固定在虎钳上，把

$\phi 3$的中心孔用$\phi 4$的钻头扩孔。

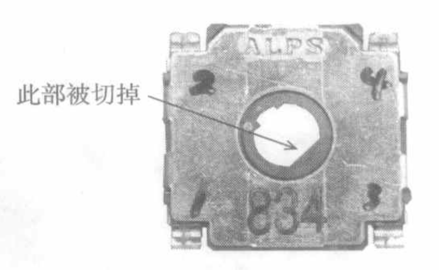
把M4长螺丝按图5.22(b)固定在虎钳上，按40mm的长度用锯截断。此40mm的长螺丝将是传感器的轴。



(a)把平齿轮的孔扩大



(b)把长螺丝截成40mm

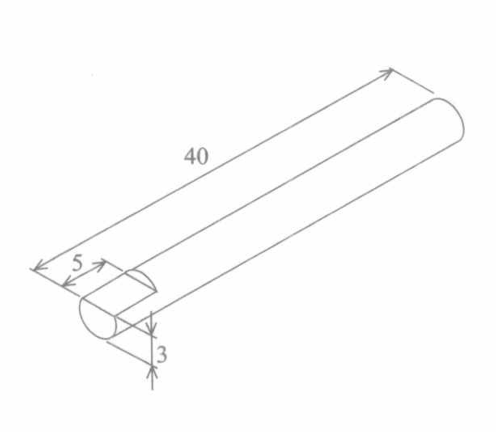


(c)传感器的轴孔

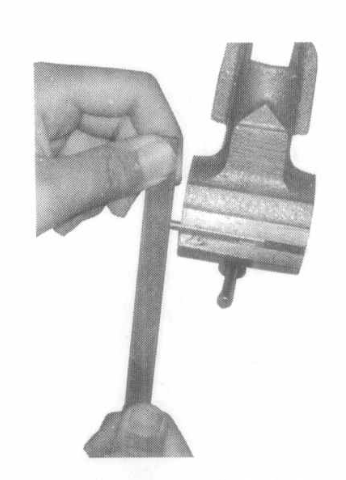
图5.22 齿轮箱的加工

仔细看一下传感器的轴孔，轴孔的一部分被切掉了，如图5.22 (c) 所示。孔的直径为4mm，但因为被切掉了一部分，所以作为轴使用的长螺丝也要切去一部分，如图5.23 (a) 所示，只有这样，才能把齿轮的转动确切地传递给传感器。

作为轴用的长螺丝，要用什锦锉把它的一端加工成长5mm、高3mm的平面。如图5.23 (b) 所示，要边锉边测量，直到成为3mm的平面为止。



(a)M4长螺丝的加工方法



(b)用什锦锉锉平

图5.23 加工M4长螺丝

为了把旋转传感器安装在重心倾斜用的齿轮箱上，要按图5.24的尺寸加工2个齿轮箱的盖子。加工方法与在第1章制作齿轮箱盖子的方法相同。如果没有底盘铰刀，打$\phi 9$的孔是很危险的，所以要用塑料切断刀切掉。打其他的孔时，也要仔细阅读第1章的相关内容。一定要注意安全。

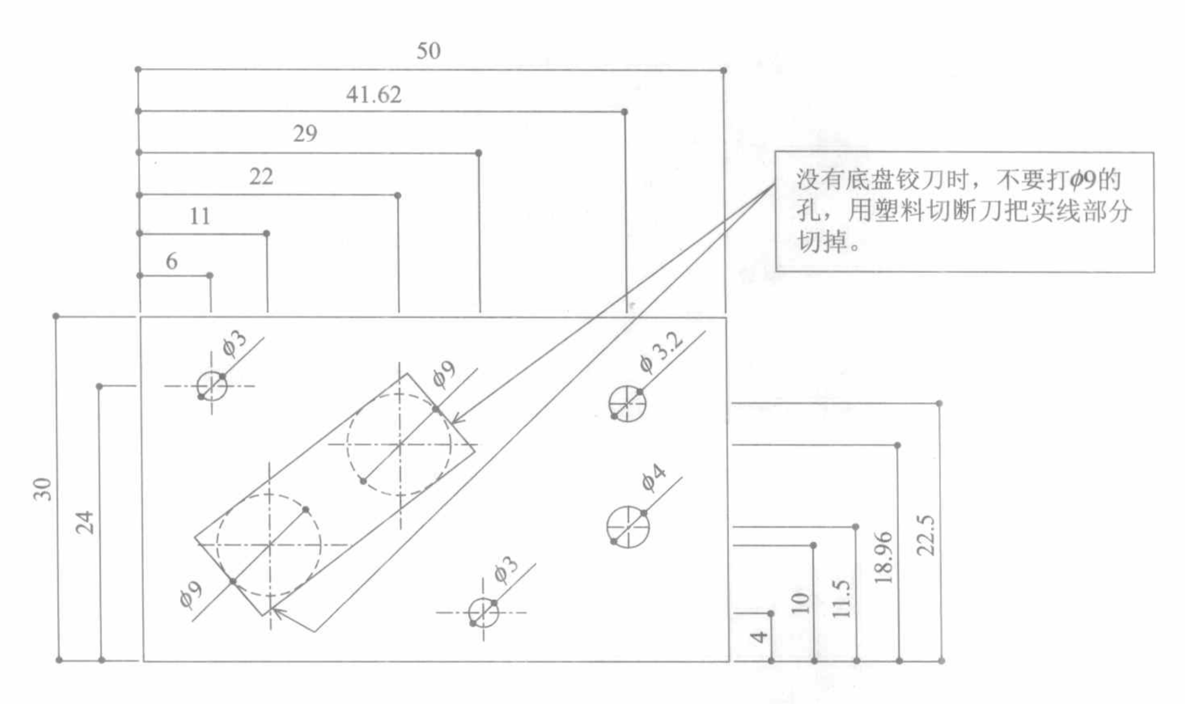


图5.24 重心倾斜用箱盖的图纸尺寸

把制作的重心倾斜用的箱盖按图5.25所示，用M3螺丝（M3×30）和螺母固定在齿轮箱上。这和在第1章中的组装方法相同。注意不要忘了加上垫片。

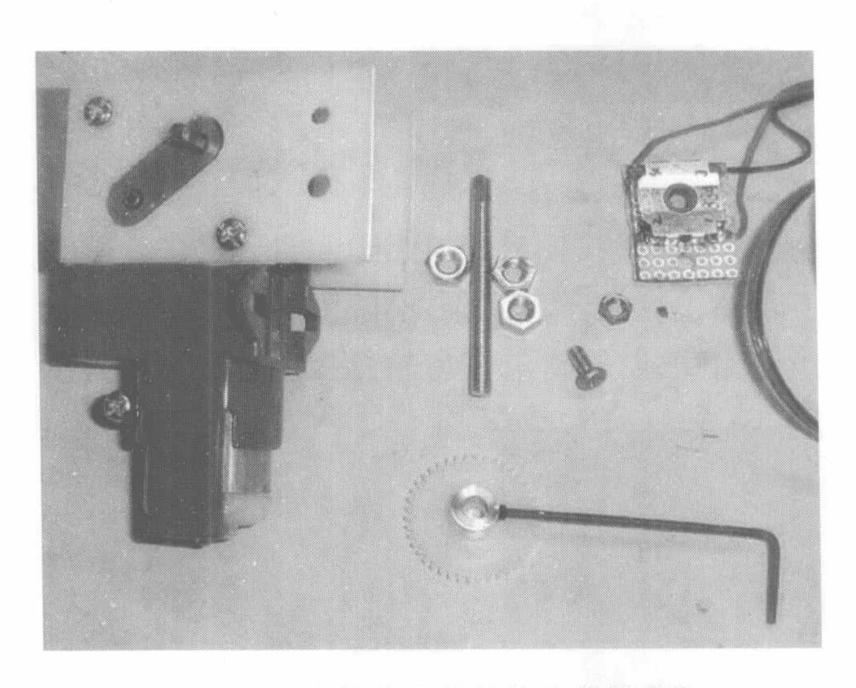


图5.25 齿轮箱和旋转传感器用零件

如图5.26所示，用M3螺丝、螺母安装旋转传感器。此时，M4长螺丝是穿过传感器的轴孔后才安装旋转传感器的，所以安装和位置咬合是同时进行的。

把为了确定位置而穿入的M4长螺丝从齿轮箱里抽出来，再次穿进去，如图5.27所示。然后，把齿数为42的齿轮、2个M4螺母依次套在M4长螺丝上。

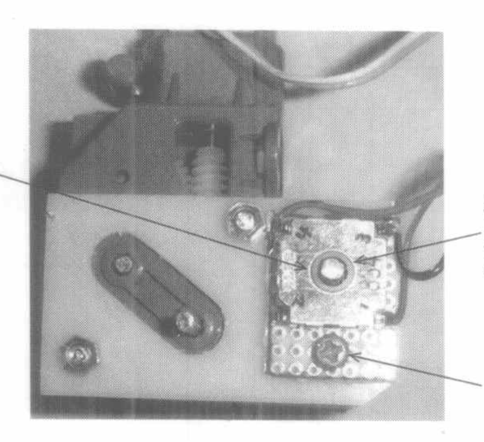


图5.26 安装旋转传感器

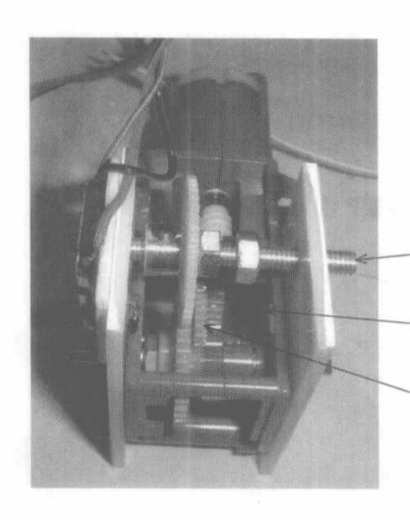


图5.27 螺母和齿轮的安装

齿轮和2个螺母的位置按图5.28确定。另外，应在外侧追加1个螺母，按图5.29所示相互拧紧。这是双螺母防松法的一种。齿轮和齿轮箱内的齿轮咬合后，再用六角扳手把齿轮固定在齿轮箱上，如图5.30所示。

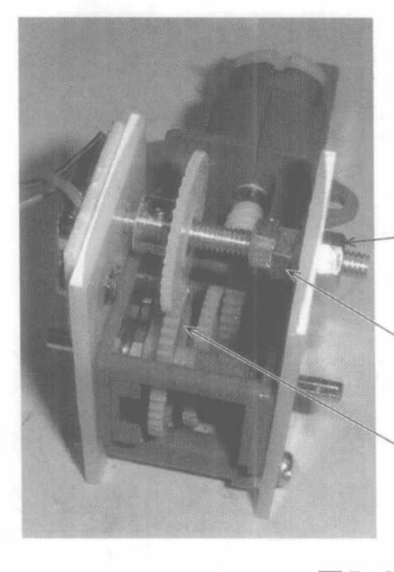


图5.28 追加螺母

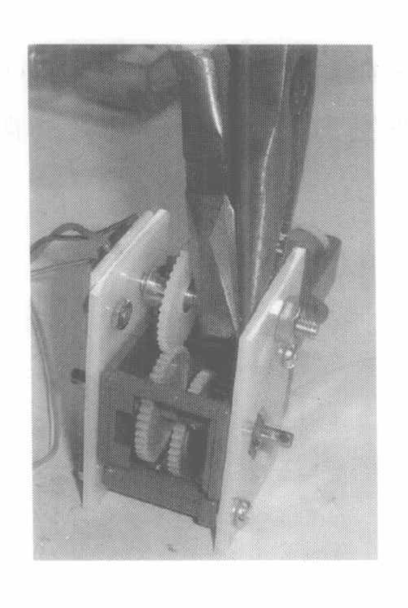


图5.29 用双螺母拧紧

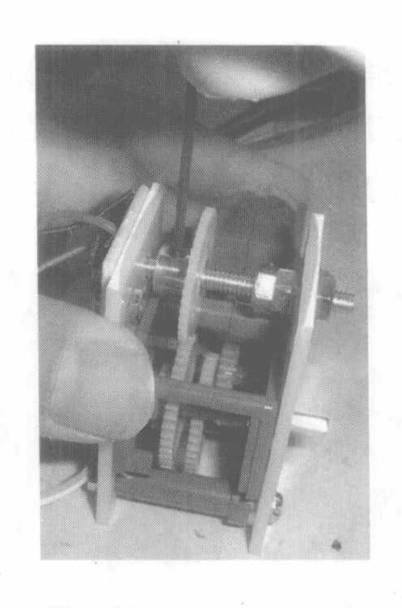


图5.30 用扳手固定齿轮

如图5.31所示，外侧也是用双螺母拧紧的，不过应和箱盖之间一定留少许间隙。

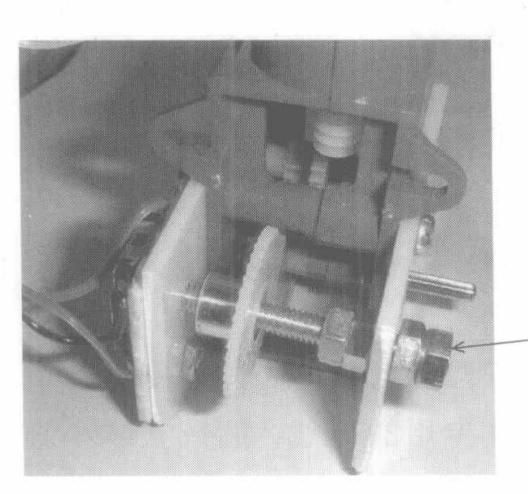


图5.31 外侧也用双螺母拧紧

如图5.32所示，把2根电线焊在电机上。

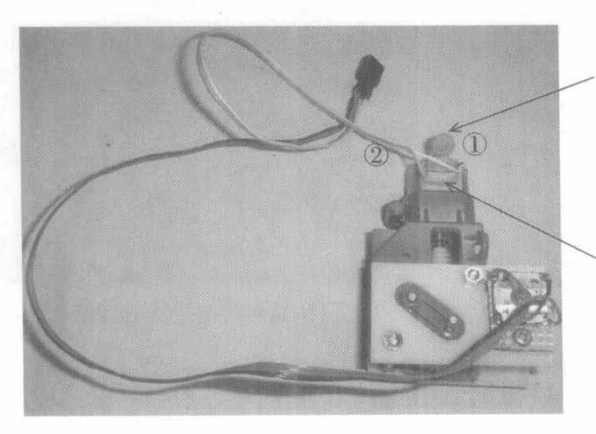
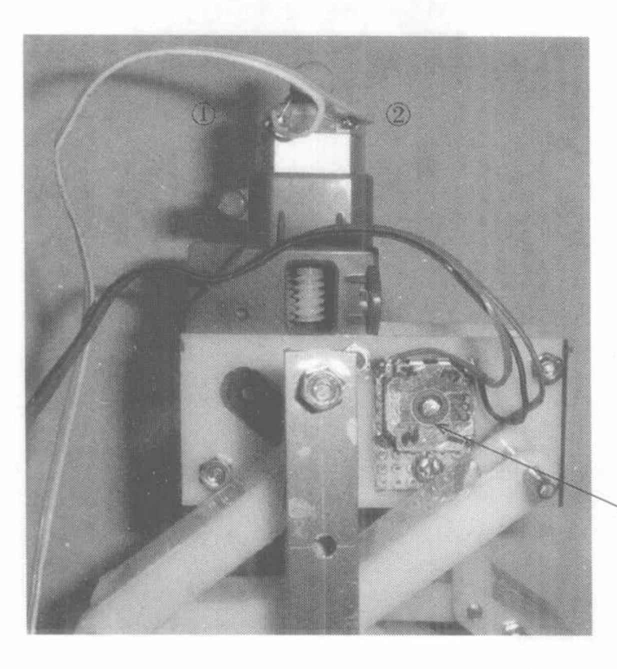


图5.32 把2根电线焊在电机上

脚齿轮箱上也安装旋转传感器，安装方法与上述完全相同，只是穿过传感器轴的长螺丝的平面部分要咬合，应按图5.33变更。电机的配线要与图5.21(b)中的①、②相符。

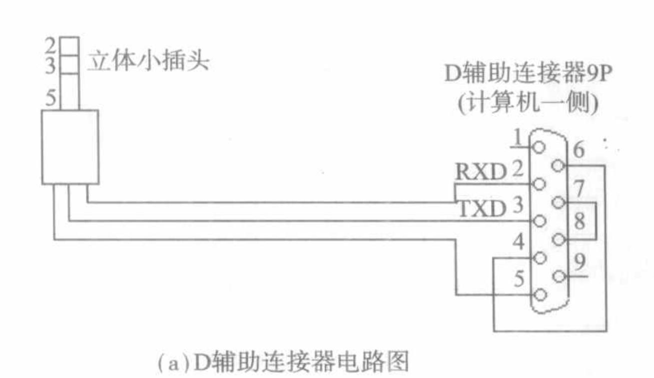


［调整长螺丝和旋转传感器轴孔的位置］
使机器人的左脚在前，长螺丝的平面部分在旋转传感器的端子号1和3之间。

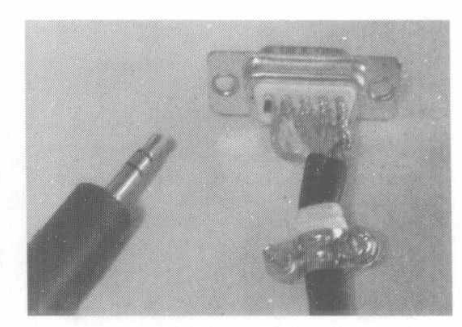
图5.33 在脚齿轮箱上也安装旋转传感器

5.4.3 制作程序写入用的电缆线

本来，写入用的标准电线为RS232C电线，但对于较小的机器人来说，RS22C的接头太大了，因此必须制作专用的电线。把带立体小插头的电线按图5.34焊接在D辅助连接器9P上（焊接型），立体小插头的头部、中部和根部分别与D辅助连接器的2脚、3脚、5脚相连接。



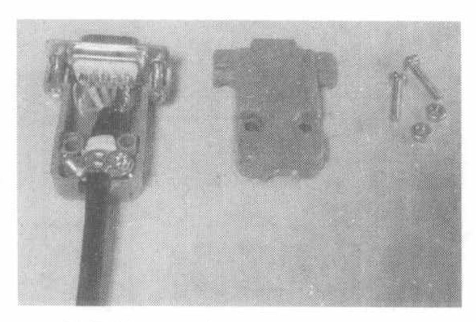
(a)D辅助连接器电路图



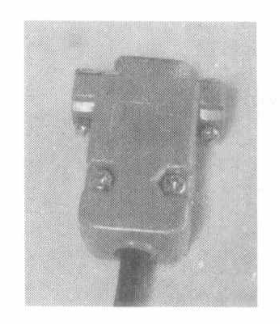
(b)D辅助连接器的焊接

图5.34 D辅助连接器

D辅助连接器用盒子按图5.35组装。



(a)把焊接后的D辅助连接器装进盒子内

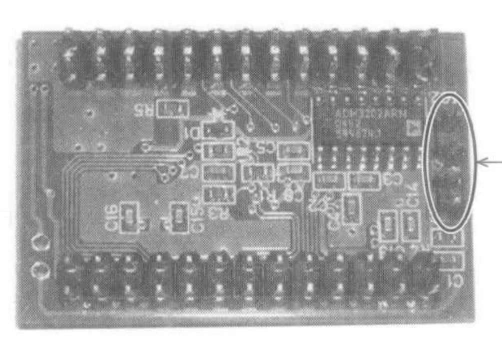


(b)放上盖子用螺丝固定

图5.35 D辅助连接器盒子的组装

5.4.4 扩展线路板的制作

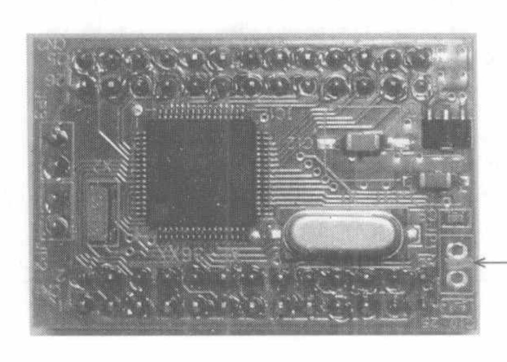
因要在AK1-H8/3694F上连接旋转传感器和电机末级前置放大器等，需要制作扩展线路板。首先，在板本体上焊接AK1-H8/3694F的配件针型插头。因切换写入程序要用制作的扩展线路板侧的开关，所以要按图5.36那样焊接针型插头。



在此面焊接针型插头

图5.36 焊接针型插头

另外，5V电源不使用配件的5V稳压器，而使用制作的扩展线路板侧的电源。按照AK1-H8/3694F的说明书切断JP1模式，可以用塑料切断刀切断，如图5.37所示。另外，扩展线路板侧电源使用最大输出电流为1A的TA4805S。



用塑料切断刀切断JP1的模式

图5.37 切断JP1的模式

以下将开始制作搭载AKI-H8/3694的扩展线路板，其电路图如图5.38所示。

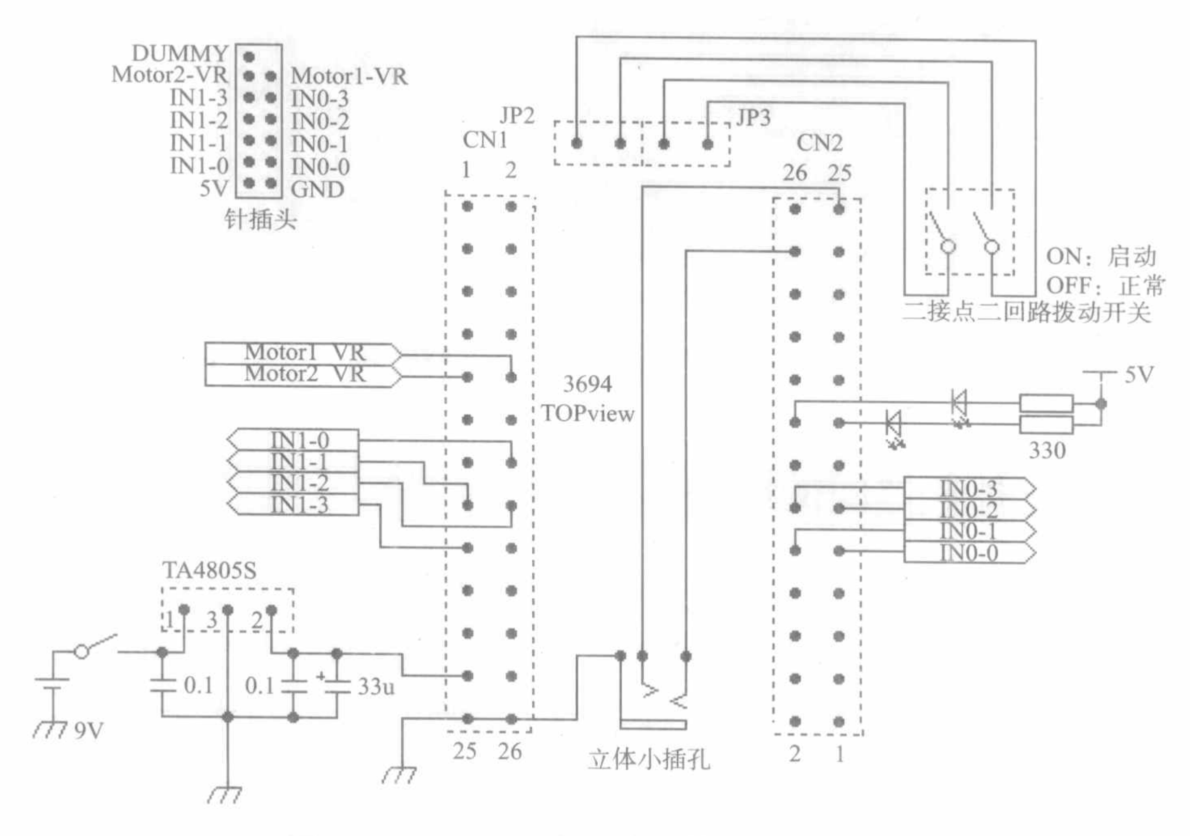


图5.38 AKI-H8/3694F扩展线路板电路图

1.零件配置

图5.39是在万能板上的零件配置图。在线路板上，有事先印刷好的1~25个数字及A~D的字母，可作为配置零件时参考。

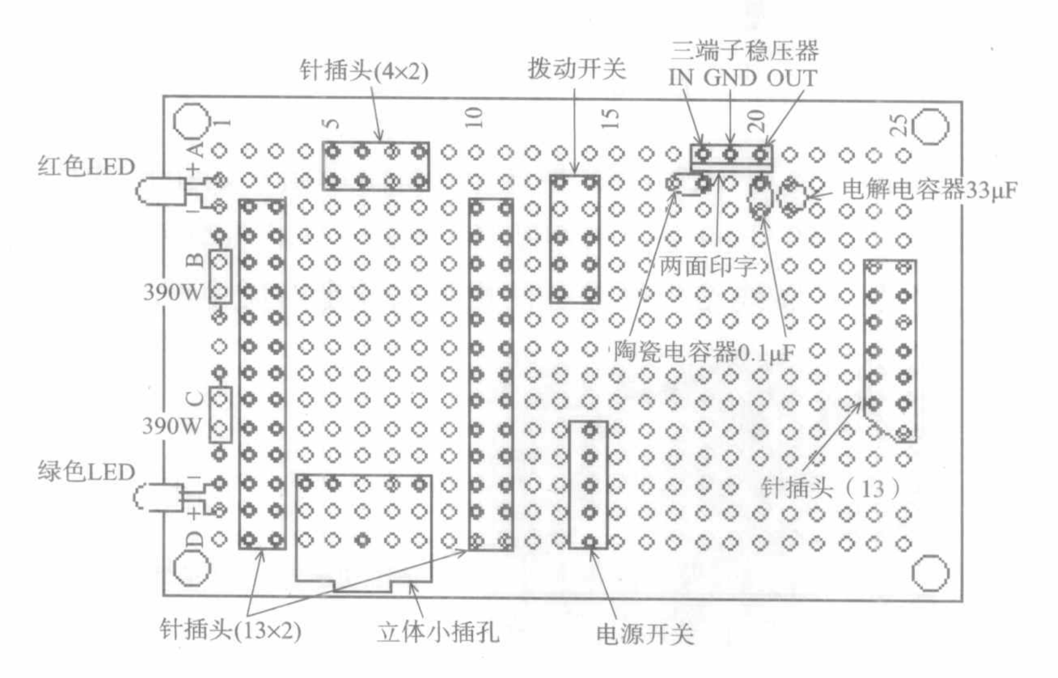


图5.39 AKI-H8/3694F扩展线路板的零件配置图（从零件侧看）

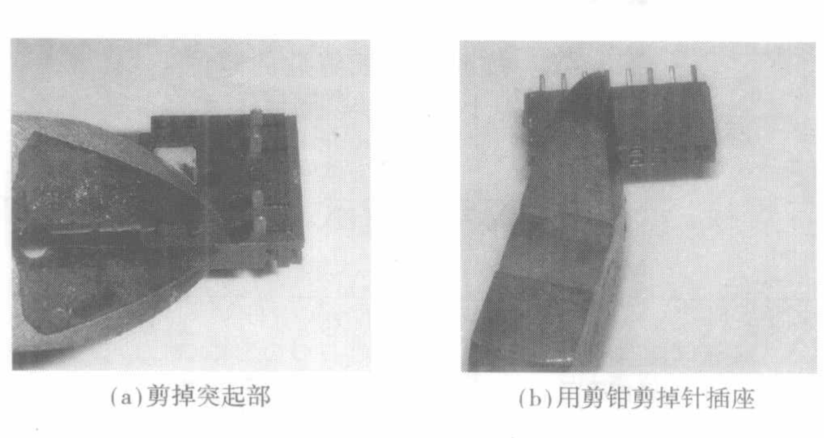
LED和电解电容器在图5.38中指定了+极和−极，像这样的带有“+”“−”极的零件，在配置时要注意方向。三端子稳压器TA4805也是有方向的。如图5.40所示。



(a)LED的方向 (b)电解电容的方向 (c)三端子稳压器的端子号

图5.40 各种零件的方向

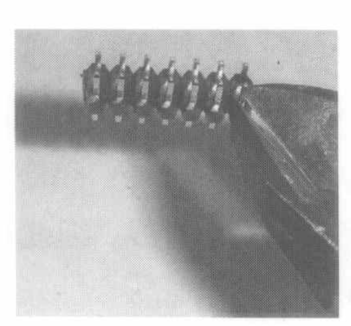
如果立体小插孔上有位置咬合用的突起部，要用剪钳剪掉，如图5.41所示。



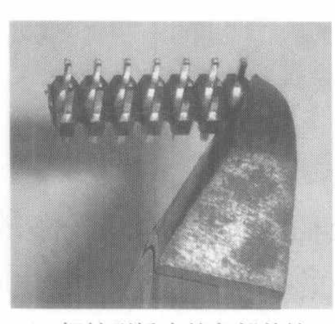
(a)剪掉突起部 (b)用剪钳剪掉针插座

图5.41 剪掉突起部和不要的部分

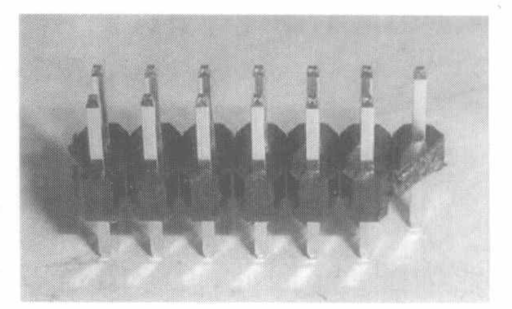
图5.39中，针插座（13×2）使用AK1-H8/3694F板的配件；针插座（4×2）把针插座（20×2）剪掉后使用，如图5.41所示；针型插头（13）也按同样方法加工。（20×2）的针型插头按（2×7）的尺寸剪掉后，再把角部的1根针用剪钳拔掉，把一角剪掉后如图5.42所示。



(a)把针型插头的针拔掉



(b)把针型插头的角部剪掉



(c)完成后的针型插头

图5.42 针型插头(13)的加工

零件准备好以后，按图5.39所示配置万能板。配置后的样子如图5.43所示。焊接前，请再次确认一下零件的方向。最后，用记号笔写上“启动”、“正常”、“ON”。

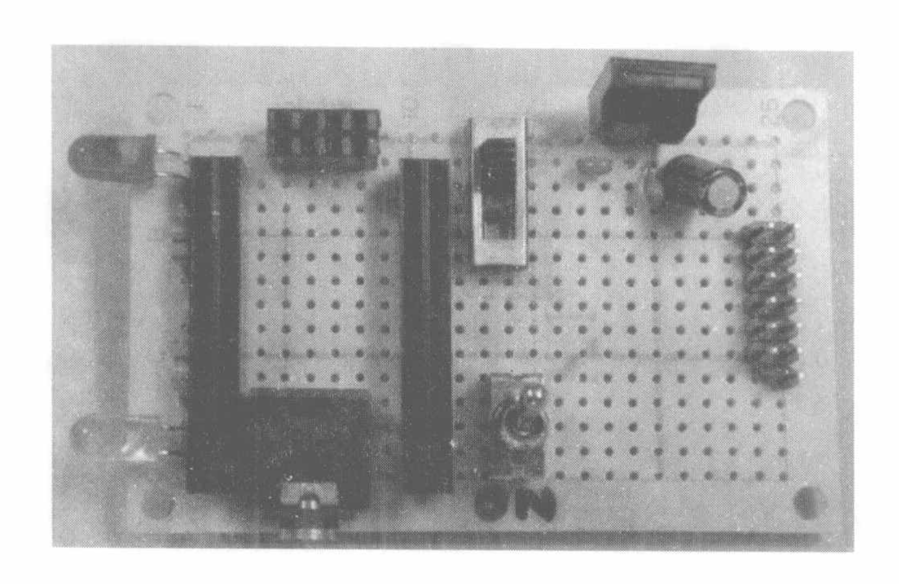


图5.43　按图5.39配置后的零件

2.焊　接

在背面进行焊接，示意图如图5.44所示。先说明一下图的看法。

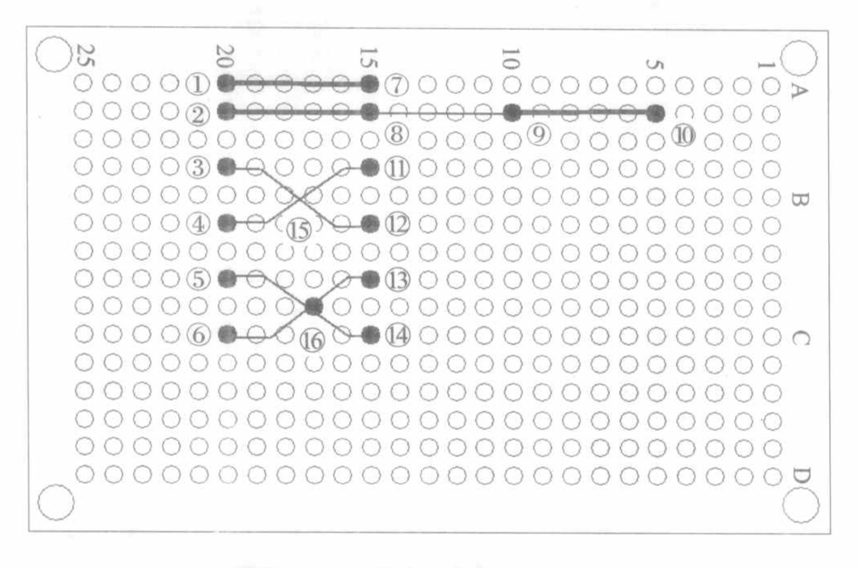


图5.44　焊接示意图的看法

(1) ●点为焊接点。

(2) 粗线和细线的不同之处在于，粗线把零件的引脚作为配线，细线以电线为配线。因此，①－⑦是零件的引脚，⑧－⑨是电线。

(3) 注意线的交差处：交差点⑮没有●，表示不焊接；交差点⑯有●，表示要

在此处把电线的皮剥去后焊接。因此，③－⑫的电线和④－⑪的电线虽然是交叉的，但③－⑪无电流通过，④－⑫也无电流通过；而⑤－⑬、⑥－⑭之间却有电流通过。微机是用电来动作的，如果在不允许有电流的地方流有电流，微机就会不动作甚至损坏。焊接时，不光要看焊接示意图，还要与图5.38仔细比较。

现在，以图5.45所示焊接示意图为基准，对配置好的零件引脚进行焊接。

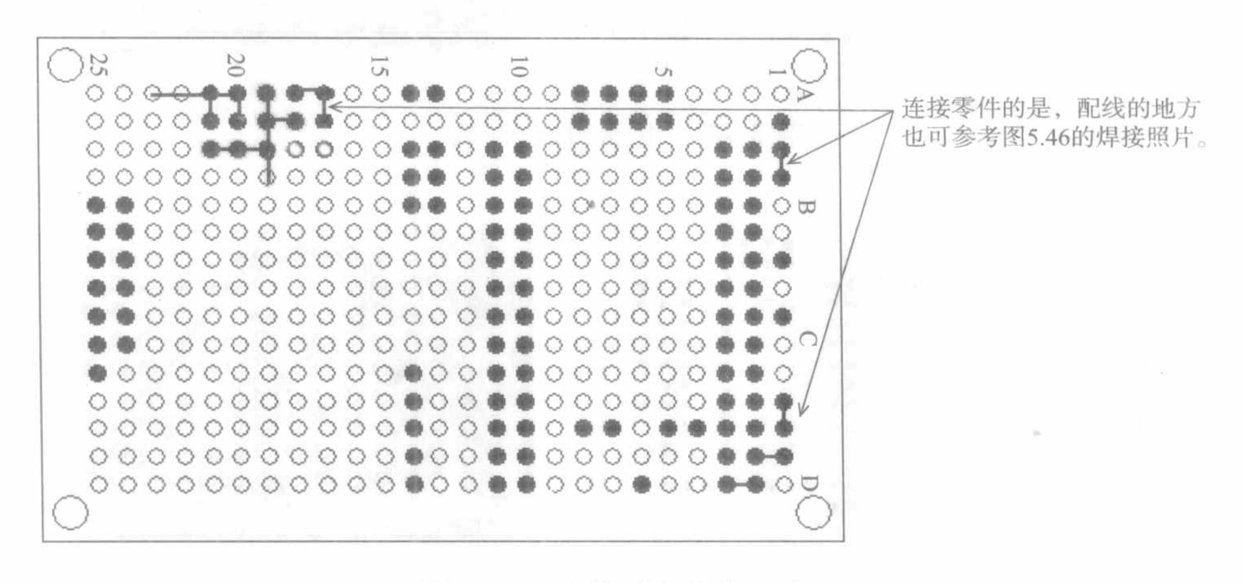


图5.45　零件引脚焊接示意图

图5.46是零件引脚的焊接实图，画○的地方表示配线利用了零件引脚，焊接时要与图5.45进行比较。在没有利用零件引脚的地方，要把引脚按适当的长度剪断后再焊接。

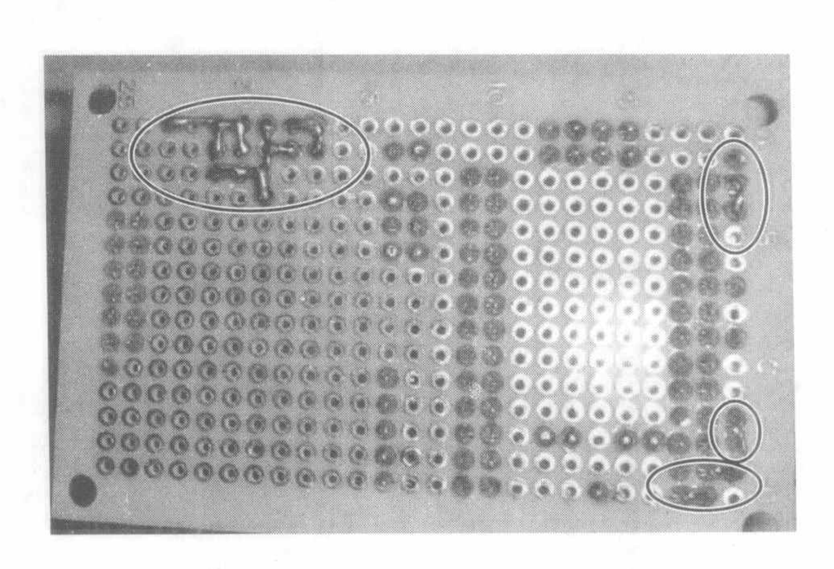
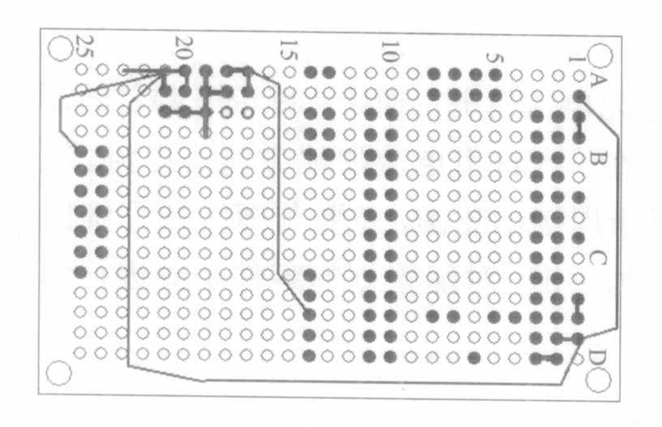


图5.46　零件引脚的焊接实图

接下来，按图5.47～图5.54进行电线配线。如在每个电线涂上颜色话，最后检查时就很容易辨认。作业时也要参考图5.38。



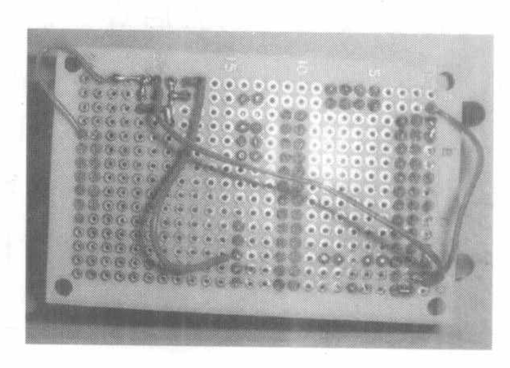
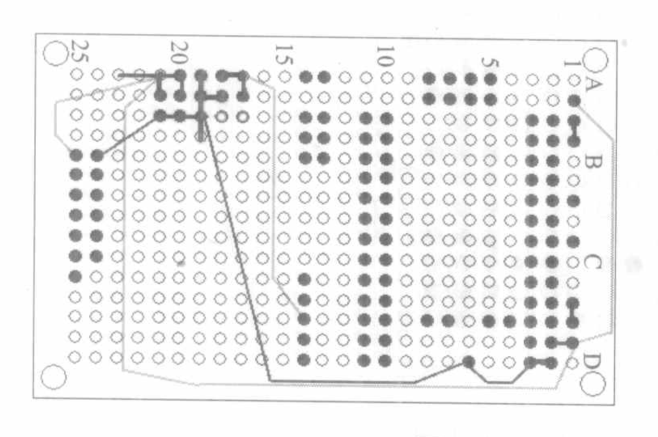


图5.47 电源+极的配线



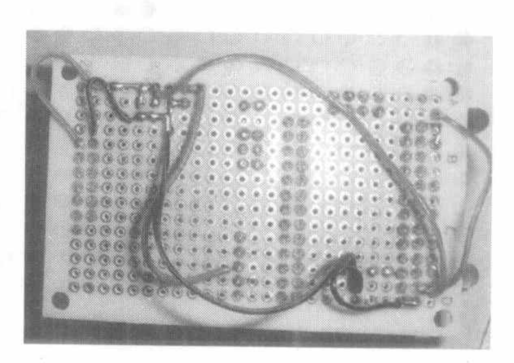
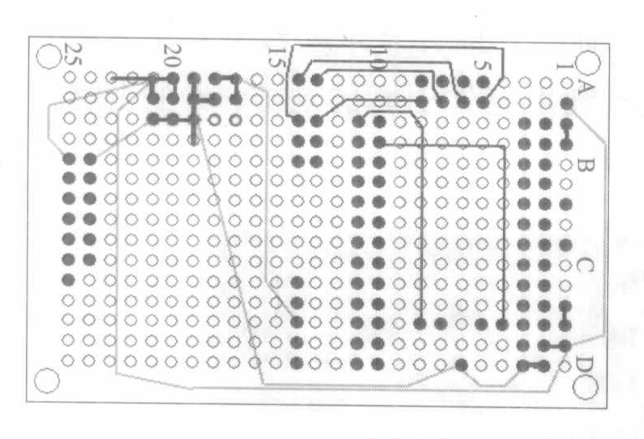


图5.48 电源−极的配线



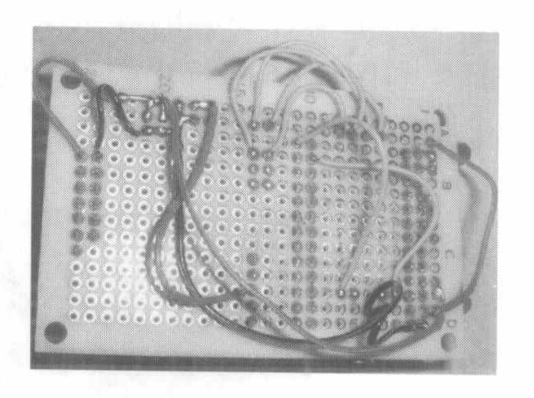
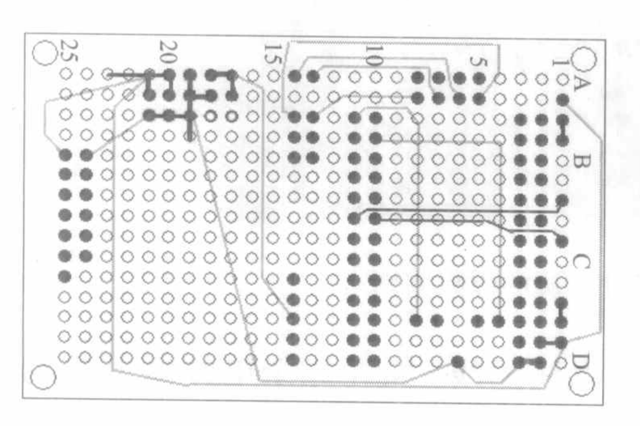


图5.49 和程序写入有关的配线



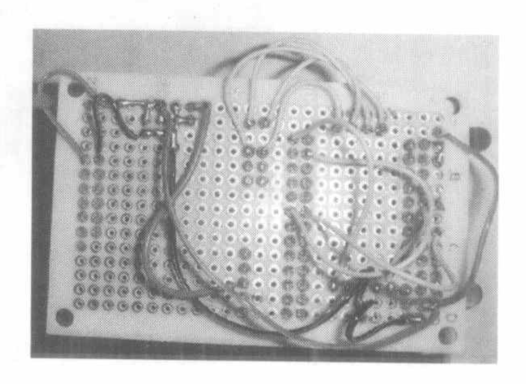
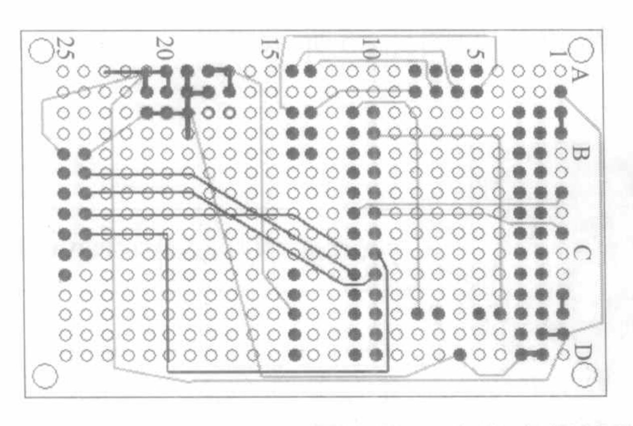


图5.50 LED的配线



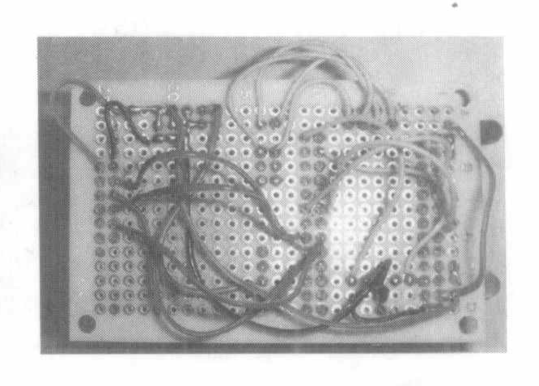
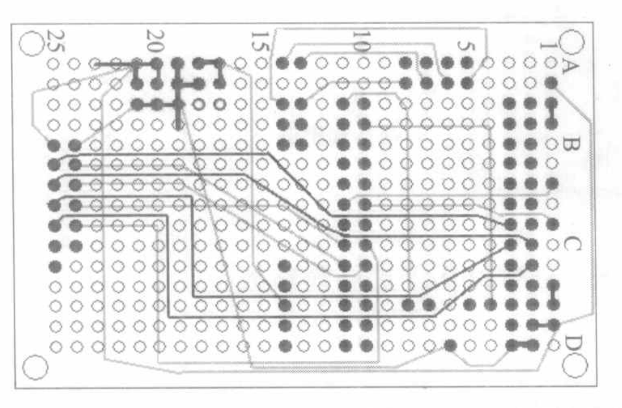


图5.51 电机末级前置放大器1的配线



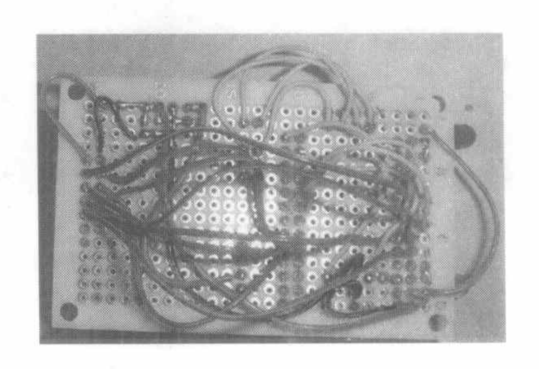
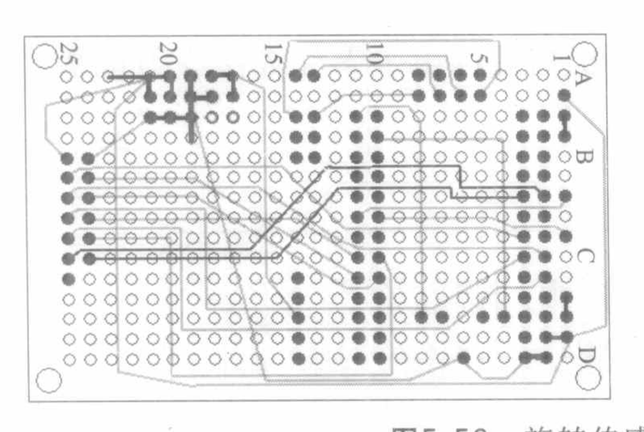


图5.52 电机末级前置放大器2的配线



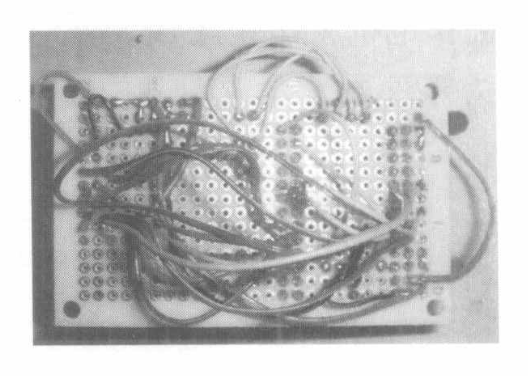
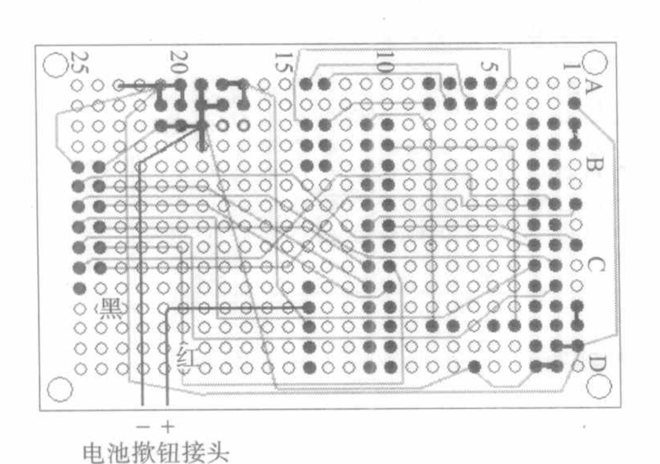


图5.53 旋转传感器的配线



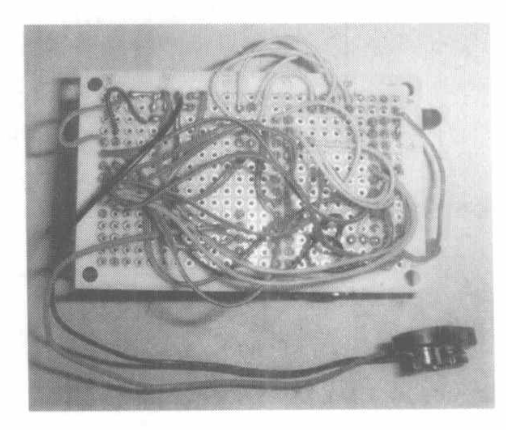


图5.54 电池揿钮接头的配线

完成后的AK1-H8/3694F扩展线路板如图5.55所示。

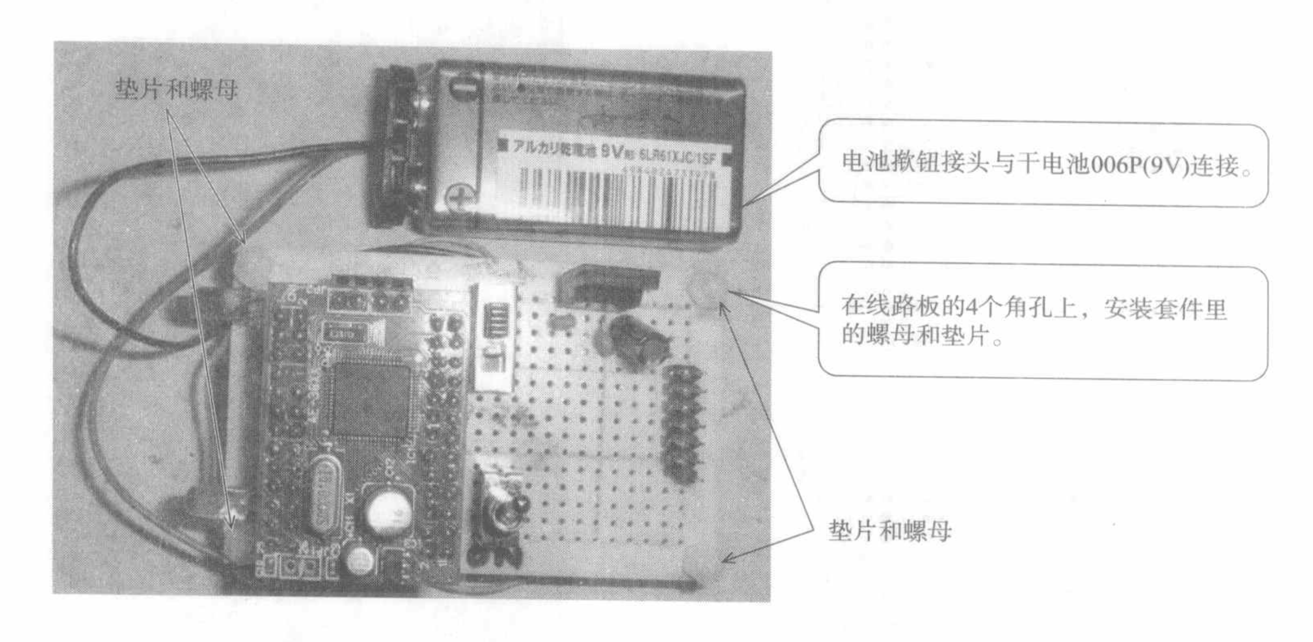


图5.55 完成后的AK1-H8/3694F扩展线路板

5.4.5 制作电机末级前置放大器

制作电机末级前置放大器时，要把需要的电子零件焊接在万能板上。图5.56为零件配置示意图。

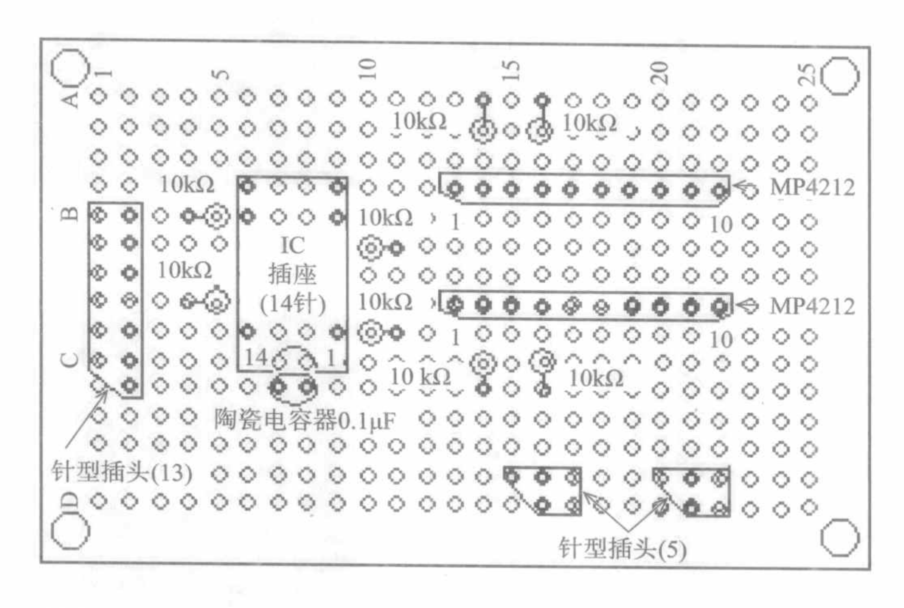
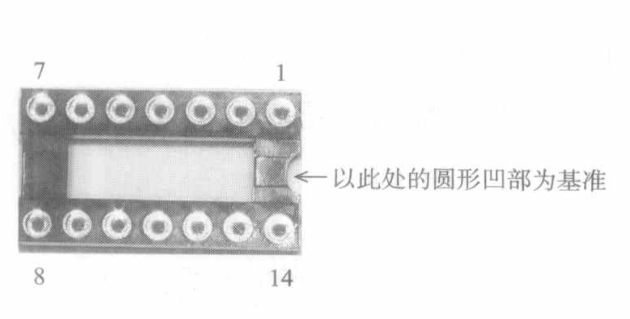
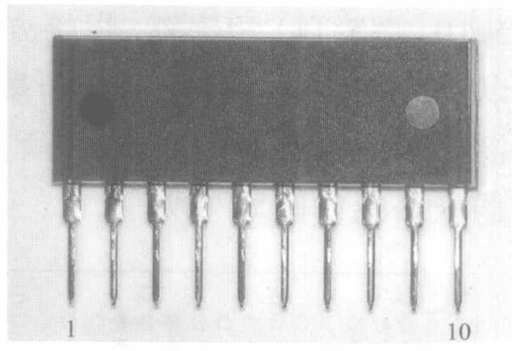


图5.56 电机末级前置放大器零件配置示意图（零件面）

决定IC插座（14针）和MP4212的端子号码，注意安装方向，如图5.57所示。



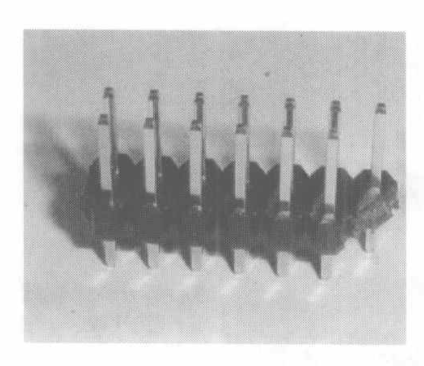
(a)IC插座端子号码



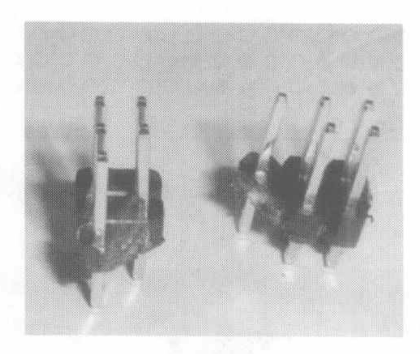
(b)MP4212端子号码(印字面)

图5.57　注意端子号码

把2个针型插头（5）和针型插头（13）加工至图5.58所示。



（a）针型插头(13)



（b）针型插头(5)

图5.58　准备针型插头

零件准备好以后，按图5.56在万用线路板上配置。图5.59为实际配置照片。

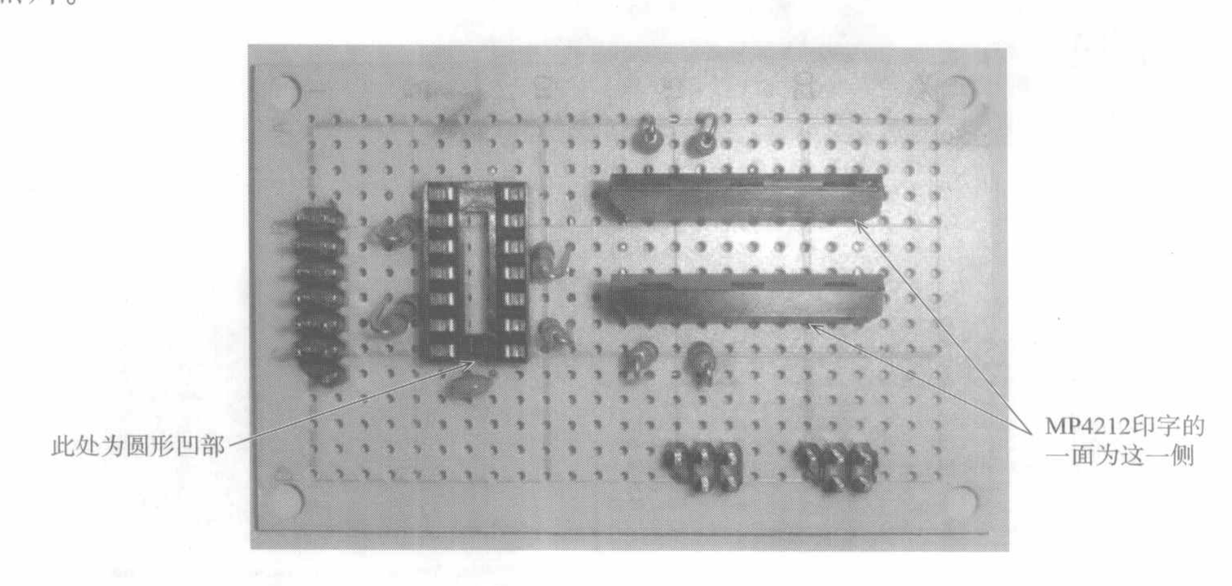


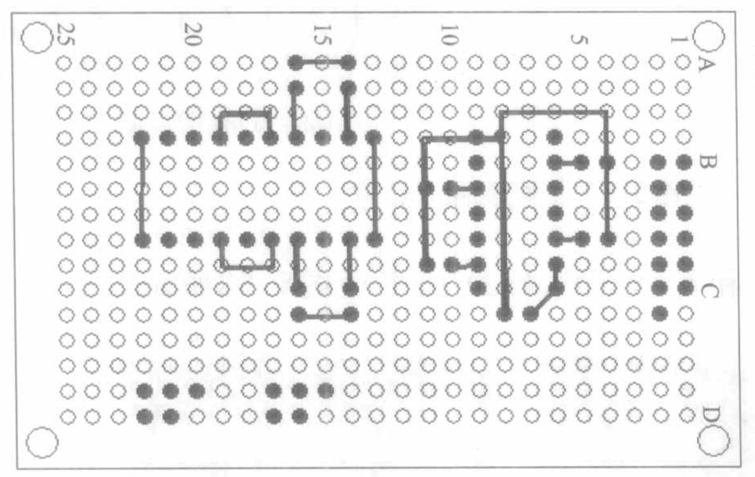
图5.59　配置零件后

焊接前，要再次确认一下零件的方向。不光要看示意图，还要和线路图

（图5.10、图5.11）相比较，焊接方法也要再次确认。

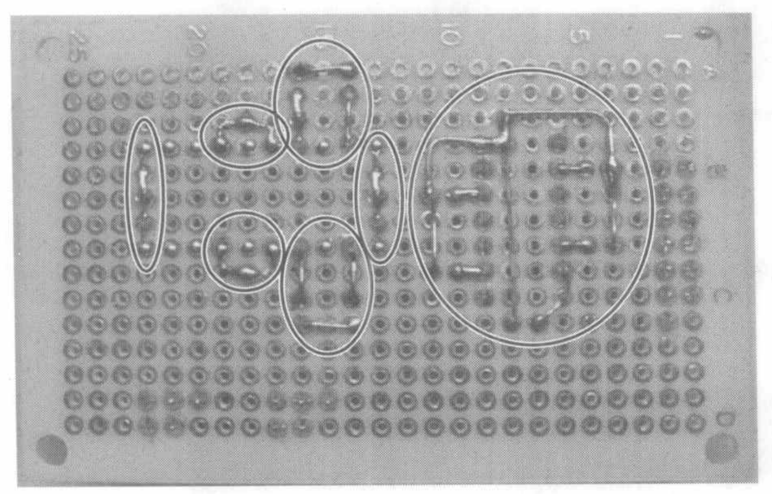
以图5.60所示焊接示意图为基准，焊接零件的引脚，如图5.61所示。

接下来，按图5.62～图5.69所示进行电线配线。完成后的电机末级前置放大器线路板如图5.70所示。



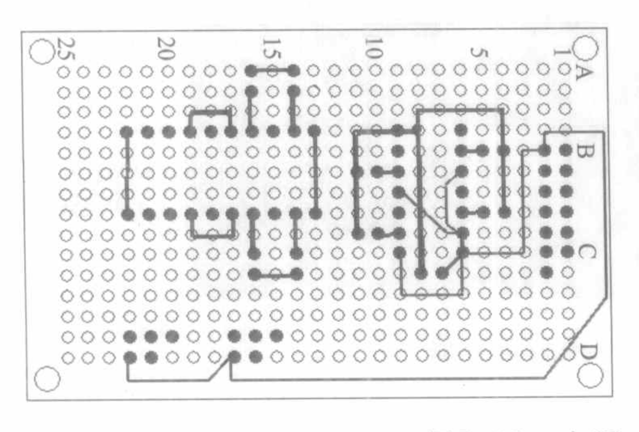
零件引脚作为配线使用的地方较多。要看清楚线路图及图5.61所示照片。

图5.60　焊接示意图（零件引脚）



O形部分表示配线为零件引脚，零件数量较多，注意作业时不要使零件加温过度。

图5.61　零件引脚焊接实例



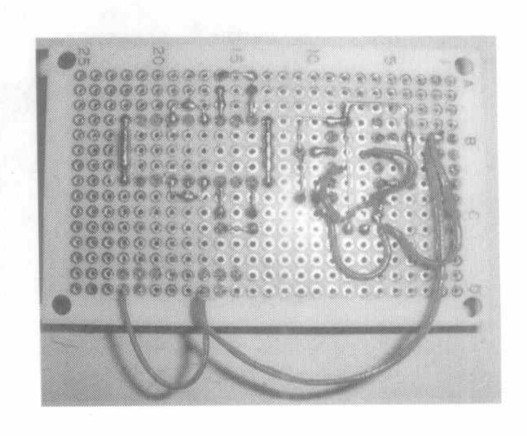
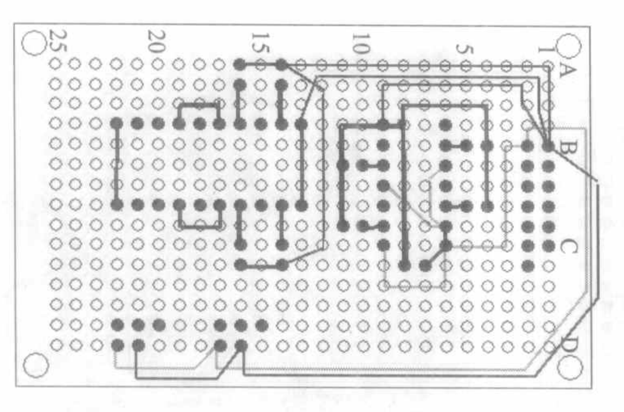


图5.62　电源+极配线



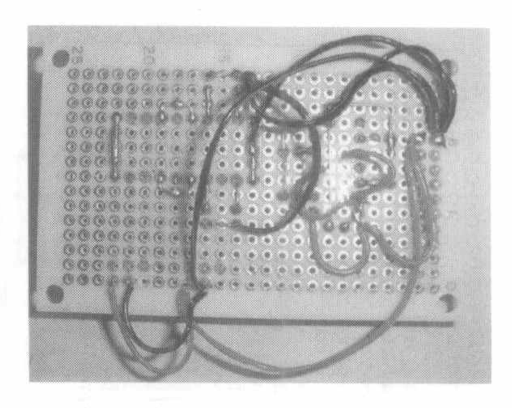
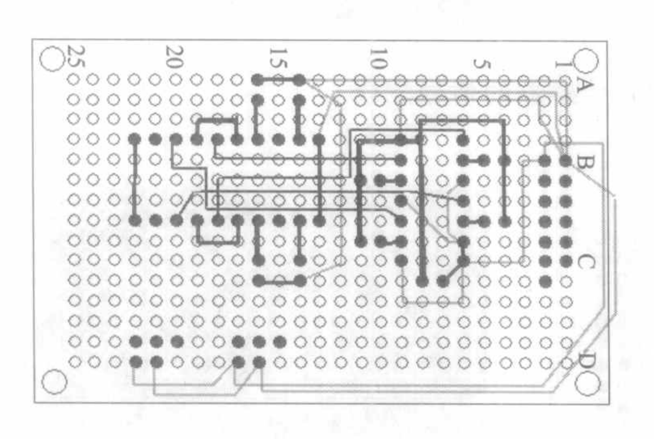


图5.63 电源−极配线



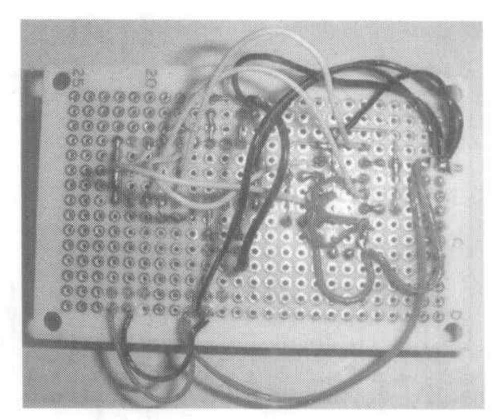
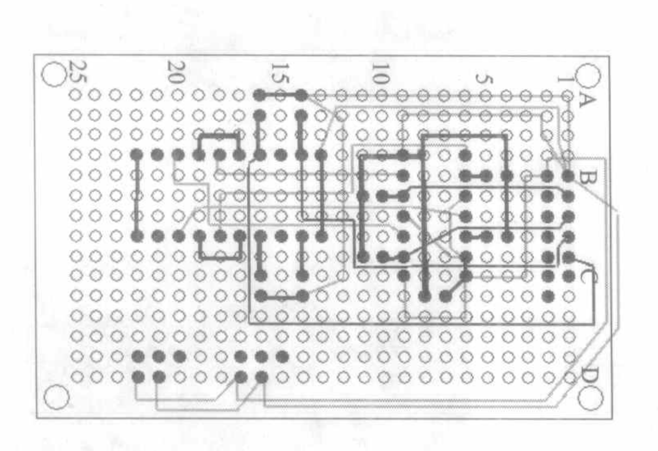


图5.64 FET、HC00间的信号配线



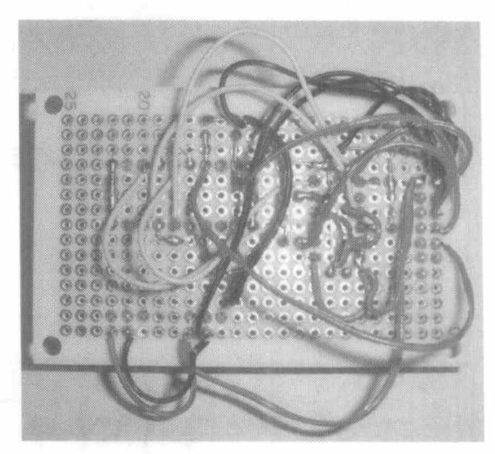
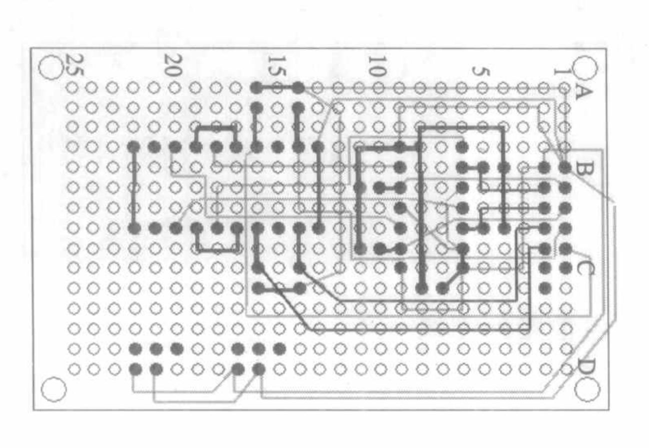


图5.65 电机1的信号配线



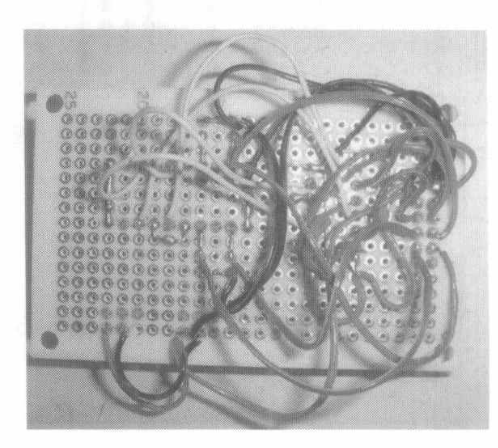
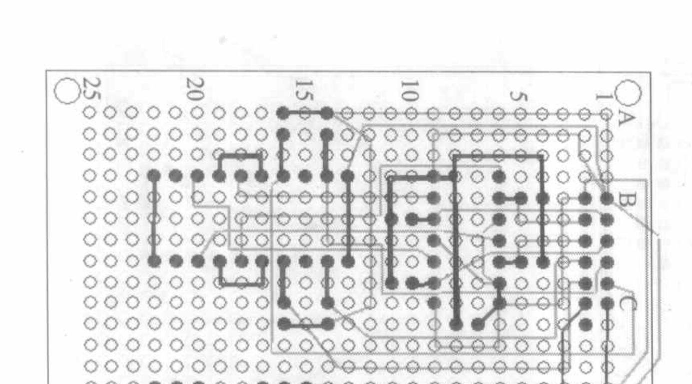


图5.66 电机2的信号配线



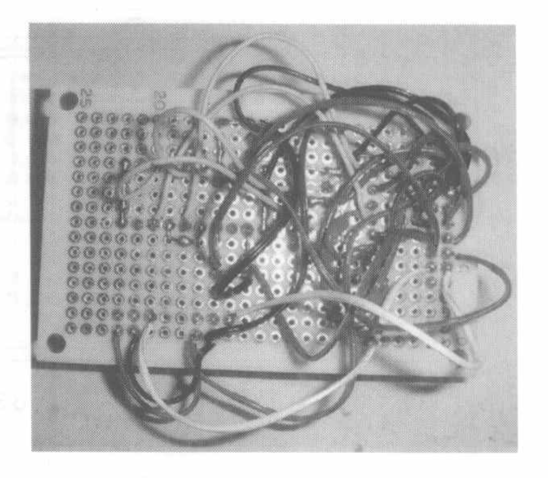
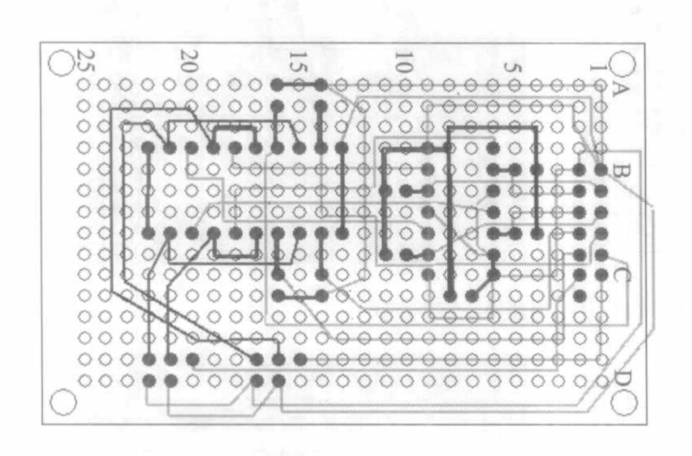


图5.67 旋转传感器的信号配线



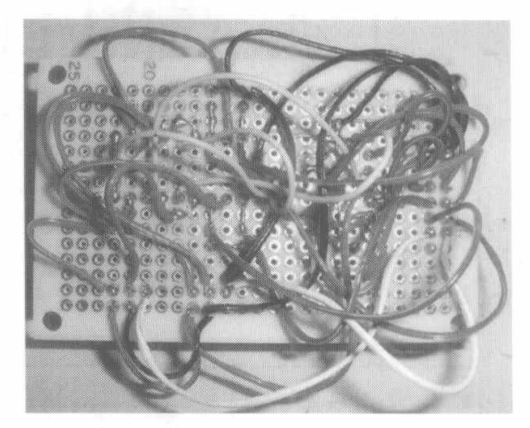
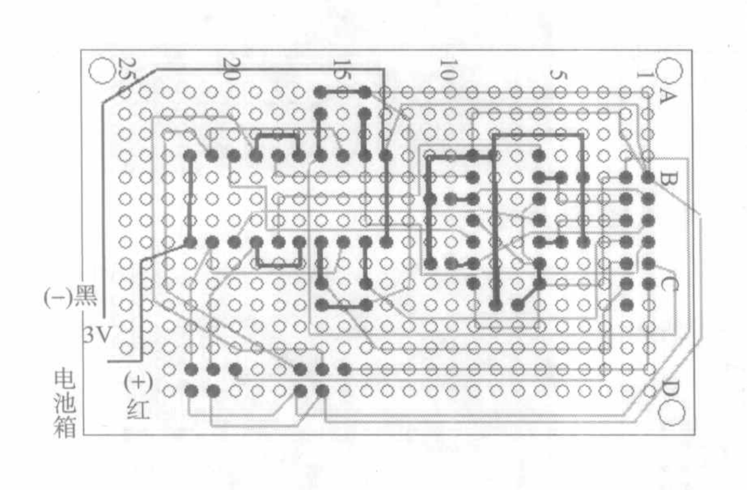


图5.68 电机配线



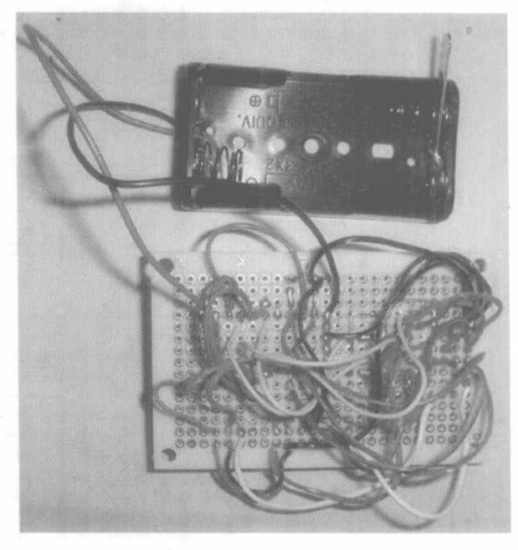
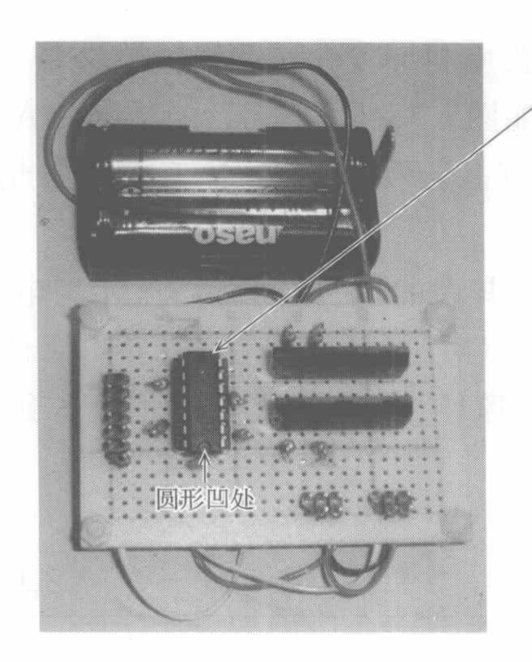
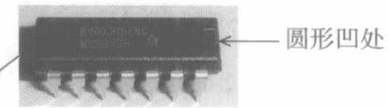


图5.69 电池箱的配线



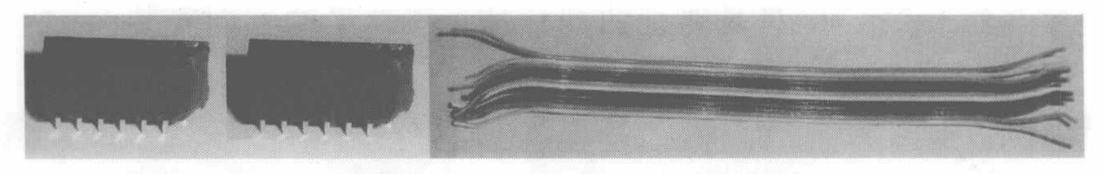


把74HC00插入14针IC插座内，
使圆形凹处在下方。

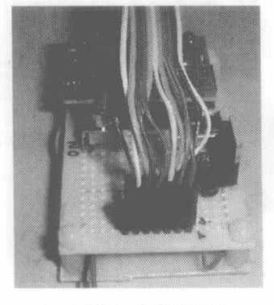
图5.70 电机末级前置放大器线路板

5.4.6 把制作的线路板装入机器人

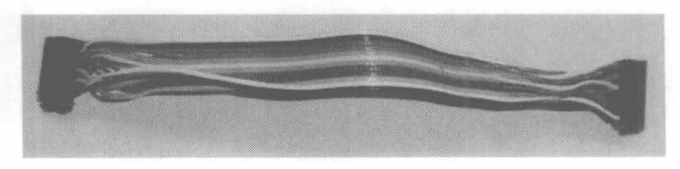
首先，制作连接电机末级前置放大器线路板和AK1-H8/3964F扩展线路板的电线。把图5.71 (a) 所示加工好的2个针型插座 (13) 和15cm长的12芯电线准备好。像图5.20的 (2×3)针型插座那样，穿过热收缩管后焊热电线。电线的芯数较多，如果像图5.71 (b) 所示的那样，把针形插座插到预先做好的针型插头上的话，作业将简单得多。图5.71 (c) 是完成后的电线。之后，将把扩大线路板和电机末级前置放大器线路板安装到机器人上，再用此电线连接。



(a)准备2个针型插座(13)和15cm长的12芯电线



(b)插入针型插头



(c)完成后的电线

图5.71 制作连接电线

接下来，用ABS板制作安装在电机末级前置放大器线路板和AK1-H8/3694F线路板后面的保护板。如图5.72所示，把万能板放在ABS板上，用记号笔划出一边的线，用打孔机打上记号，在充分注意安全的情况下用电钻打4个孔，再用塑料切断刀切断。

制作2块图5.72所示的保护板。其中的1块按图5.73所示用电钻打ϕ3.2的孔，再从它的背面穿入4根M3螺丝（M3×6），装上10mm支撑柱套件里的支撑柱。图5.74中已经安装了3个支撑柱，螺母将在安装电机末级前置放大器线路板时使用。

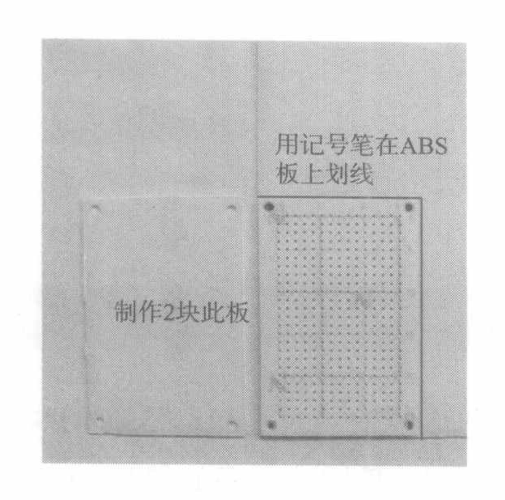


图5.72 保护板的制作

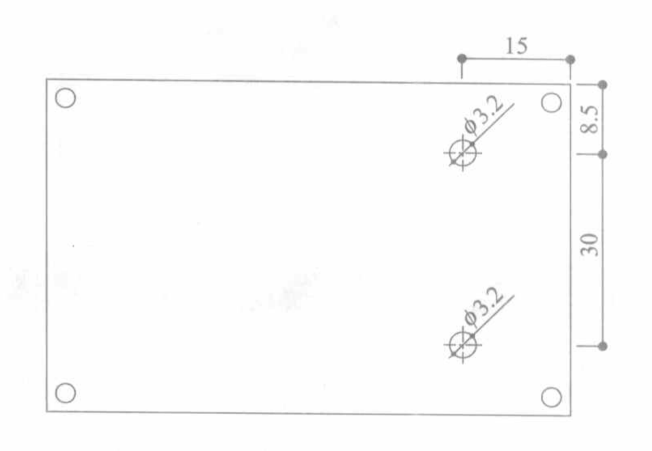


图5.73 在保护板上追加孔

图5.55中，AK1-H8/3694F上已经安装了支撑柱，所以把制作的保护板从背面用4根M3（M3×6）螺丝安装。

把M3螺丝（M3×12）和螺母固定在重心倾斜箱的孔上（在第3章制作的），其位置如图5.75所示。再按图5.76所示，安装电池安装用箱和曲柄杆。安装顺序与第3章相同，只是要把曲柄杆按近于水平的方向安装，曲柄杆有3

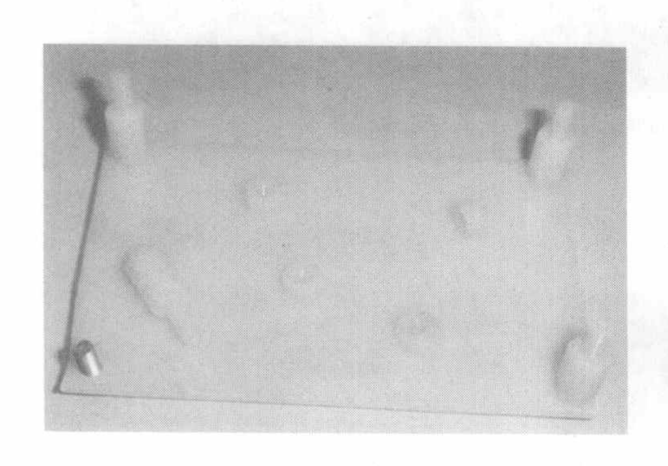


图5.74 安装支撑柱

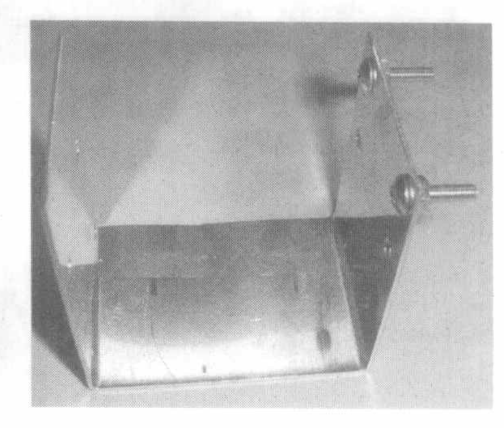


图5.75 在重心倾斜箱上安装M3螺丝

个孔的一侧为传感器的一侧。按图5.77所示安装齿轮箱，安装顺序与第3章相同。

在重心倾斜箱上安装电机末级前置放大器线路板用的保护板，如图5.78所示。把在图5.75中安装的螺丝穿过在图5.73里追加的孔里，再用螺母固定。再按图5.79安装电机末级前置放大器的线路板，用秋月电子的10mm支撑柱套件里的螺母固定。

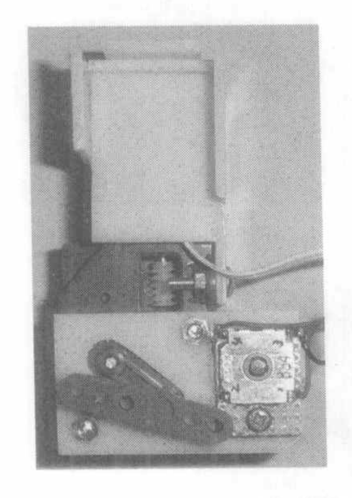


图5.76 电池安装用箱

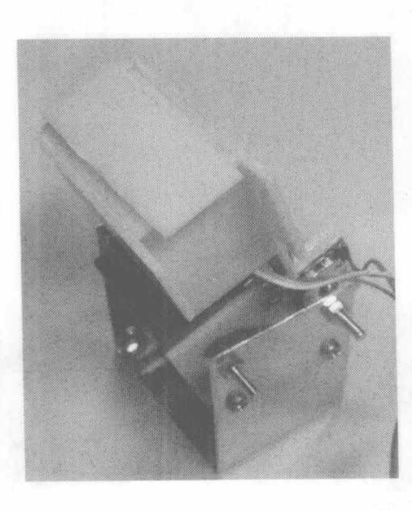


图5.77 齿轮箱的安装

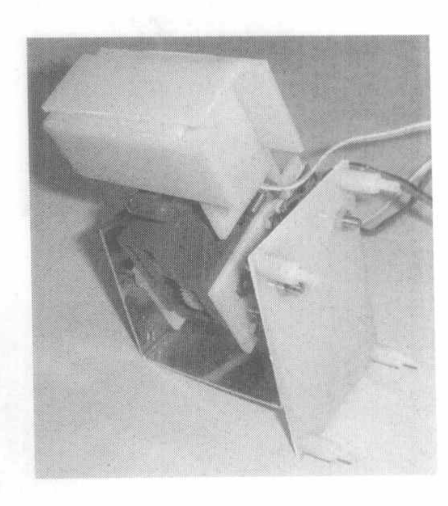


图5.78 线路板衬板的安装

如图5.80所示，在电池安装箱的上部，用粘接剂把1块ABS板粘牢。被粘接的ABS板是在第3章中制作的，此处使用的是余下的图3.26材料⑥。

电池也和第3章相同，在电池安装箱的侧面用双面胶带粘上。在上部把AK1-H8/3694F扩展线路板的保护板用双面胶带粘上。

如图5.81所示，把从电机来的2组电线及连接扩展线路板和电机末端前置放大器线路板的1组电线分别插入连接器。为了不使连接器的方向搞错，曾经加工了1角，请注意它的方向。

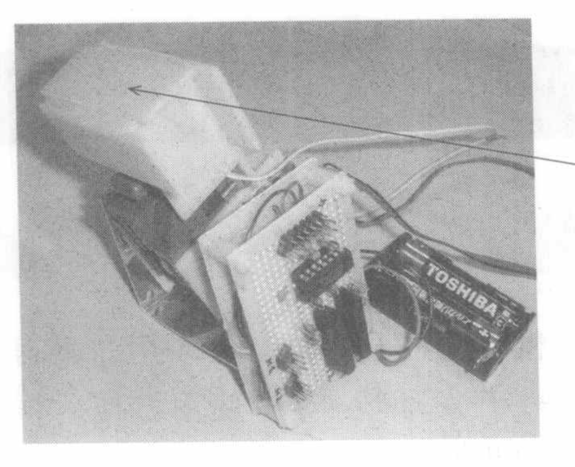


图5.79 电机末端前置放大器线路板的安装

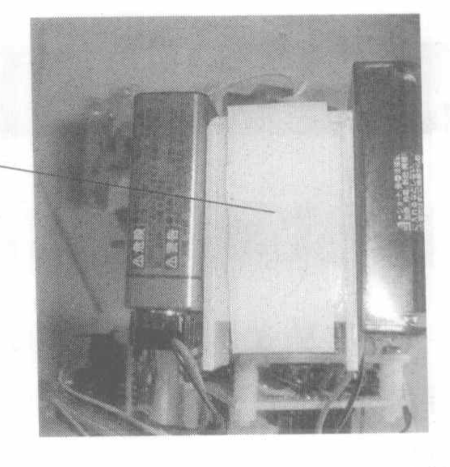
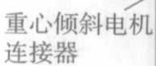
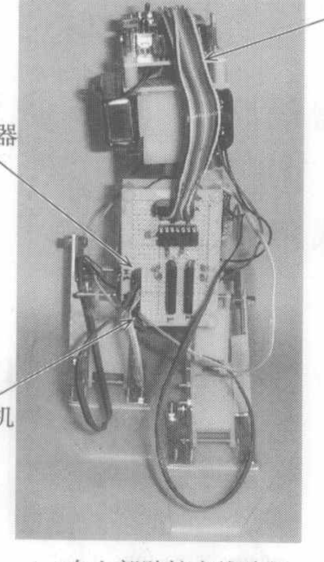
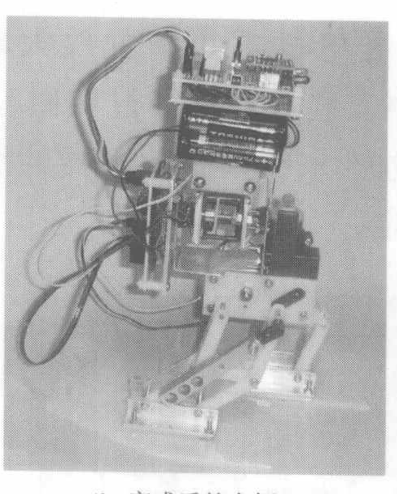


图5.80 在电池安装箱的上部粘贴板子

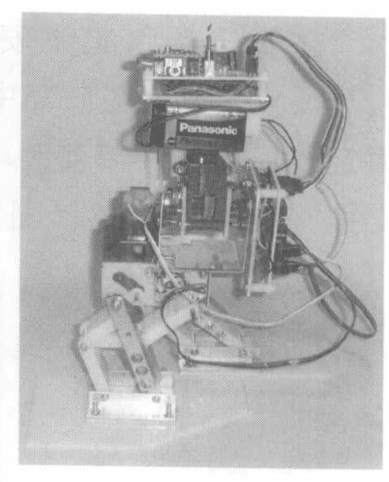




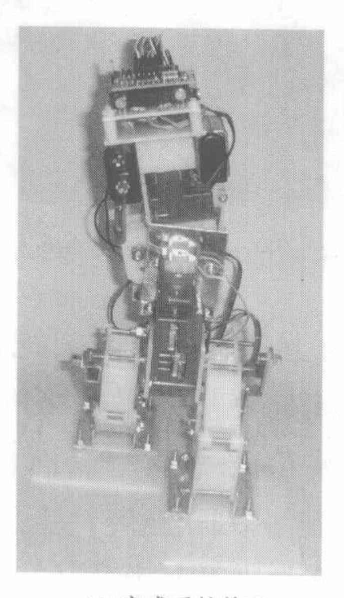
(a)在上部贴扩大线路板



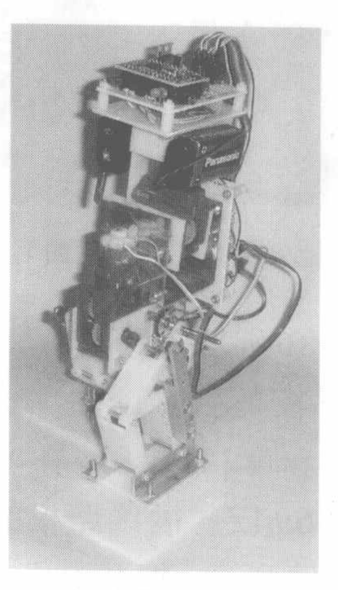
(b)完成后的右侧面



(c)完成后的左侧面



(d)完成后的前面



(e)完成后的斜方向

图5.81 完成后的机器人

5.5 程 序

5.5.1 程序的编写

从这一节开始编写控制双足步行机器人的程序。编程使用的语言为C语言。C语言是控制程序广泛使用的语言，开发环境丰富，使用方便。本书中使用免费软件GCC DeveloPer Lite的开发环境进行程序编写。

关于程序的写入及向微机的输入方法，将在5.5.2节加以说明。对于初学者来说，无论如何也要把本书的程序写入微机，请机器人动一动，来体会一下控制的乐趣及C语言的方便。

本书的双足步行机器人步行要点，如在第3章实验的那样，通过脚动作的联动使重心倾斜，始终把身体的重心放在一只脚的支撑区。例如，为了使右脚抬起向前迈步，必须：

①左脚在前方；

②使重心向左倾斜；

③向前迈右脚。

把这些用微机进行控制时，相应的时序如图5.82所示。

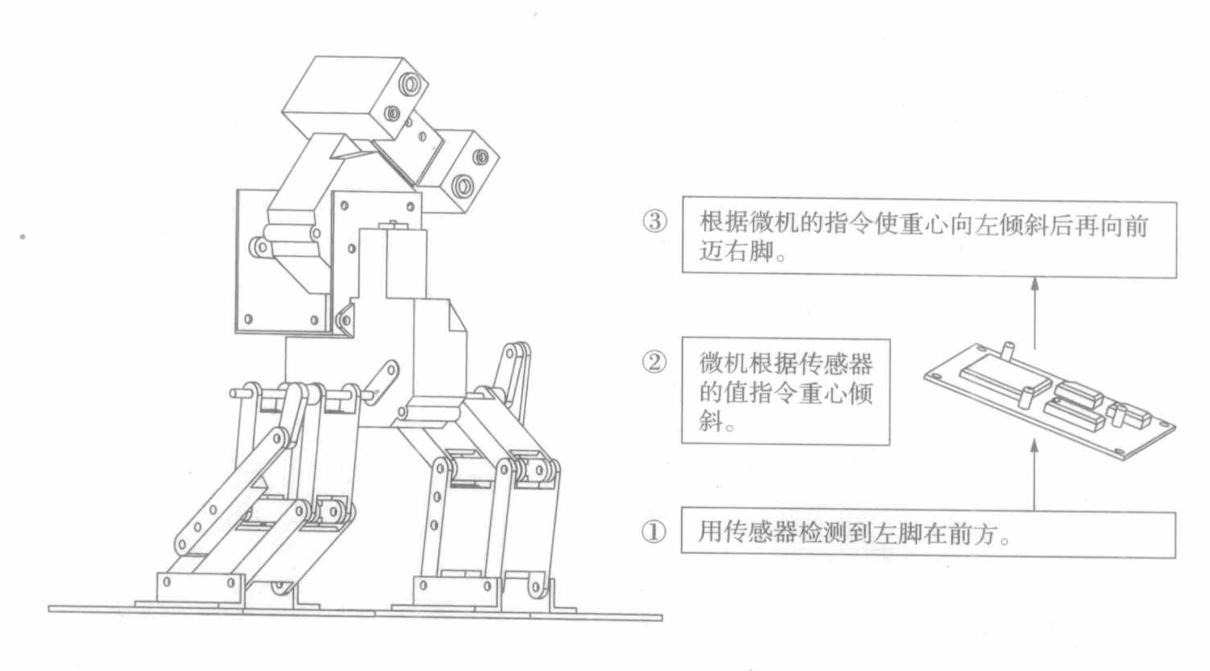


图5.82 用微机控制的时间

基本程序为以下4个：

①让脚电机转动的程序；

②让重心倾斜电机转动的程序；

③从旋转传感器上读出脚电机转动位置的程序；

④从旋转传感器上读出重心倾斜电机转动位置的程序。

那么，让我们编写让电机转动的程序吧。已制作出的双足步行机器人的控制电路为H电桥电路（图5.10、图5.11）的IN0-0～IN0-3和IN1-0～IN1-3，分别用电缆线与AK1-H8/3694F扩展线路板的IN0-0～IN0-3和INI-0～INI-3连接在一起，如图5.83所示。

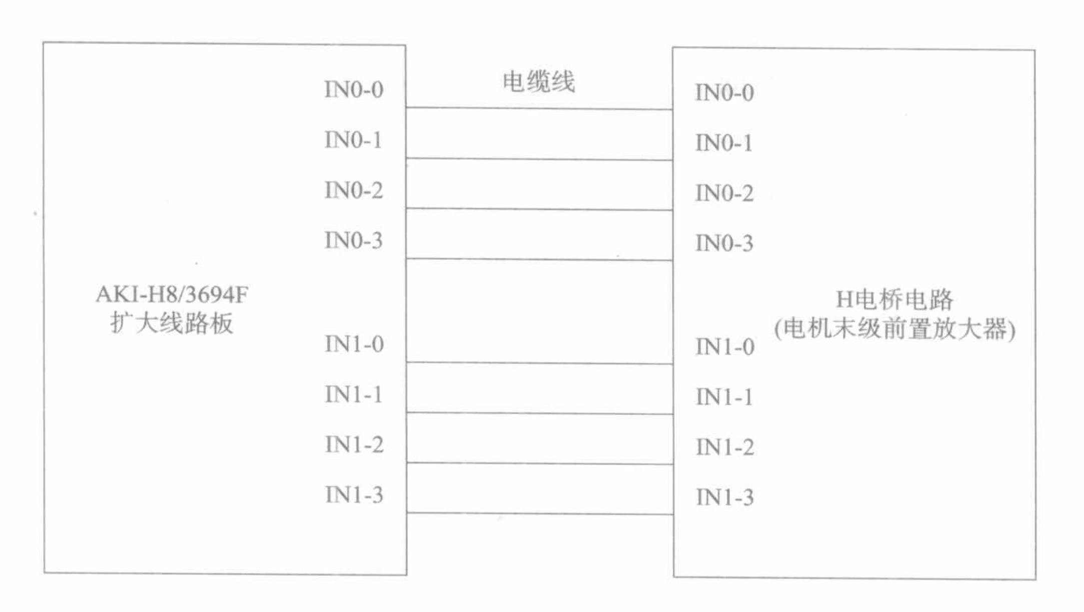


图5.83 AK1-H8/3694F扩大线路板和H电桥电路的连接

微机的I/O端口和H电桥电路相连接着，所以从I/O端口上发出“0”和“1”的信号（“0”即为0V，“1”为5V），用来控制H电桥电路的ON和OFF。

IN0-0～IN0-3、IN1-0～IN1-3程序中具体使用的AK1-H8/3694F的端口号码为

```
IN0-0: IO.PDR8.BIT.B0
IN0-1: IO.PDR8.BIT.B1
IN0-2: IO.PDR8.BIT.B2
IN0-3: IO.PDR8.BIT.B3

IN1-0: IO.PDR5.BIT.B0
IN1-1: IO.PDR5.BIT.B1
IN1-2: IO.PDR5.BIT.B2
IN1-3: IO.PDR5.BIT.B3
```

也可以参看AK1-H8/3694F附带的资料。

因此，如果把表5.1按在实际操作程序中使用的I/O端口重新编写一次，则变成表5.3和表5.4。

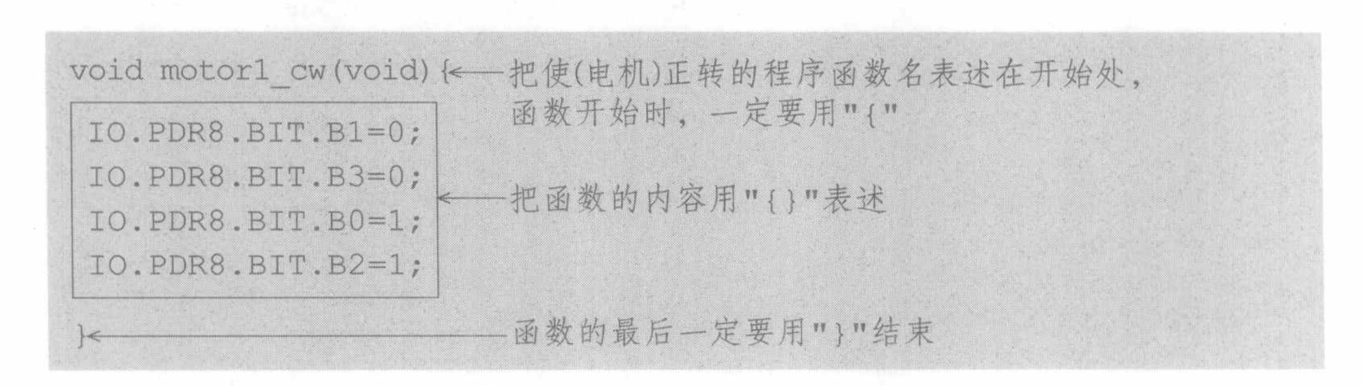
表5.3 从微机端口发出的控制脚电机的信号

	IO.PDR8.BIT.B0	IO.PDR8.BIT.B1	IO.PDR8.BIT.B2	IO.PDR8.BIT.B3
正 转	1	0	1	0
反 转	0	1	0	1
制动器	0	0	1	1
停 止	0	0	0	0
禁止1	1	*	*	1
禁止2	*	1	1	*
禁止3	1	1	1	1

表5.4 从微机端口发出的控制重心倾斜电机的控制信号

	IO.PDR5.BIT.B0	IO.PDR5.BIT.B1	IO.PDR5.BIT.B2	IO.PDR5.BIT.B3
正 转	1	0	1	0
反 转	0	1	0	1
制动器	0	0	1	1
停 止	0	0	0	0
禁止1	1	*	*	1
禁止2	*	1	1	*
禁止3	1	1	1	1

脚电机正转时，按表5.3的正转状态执行程序。另外，为了不执行禁止状态，请注意端口上发出信号的顺序：



同样，反转时，按表5.3的反转状态执行程序：

```
void motor1 _ ccw(void){
 IO.PDR8.BIT.B0=0;
 IO.PDR8.BIT.B2=0;
 IO.PDR8.BIT.B1=1;
 IO.PDR8.BIT.B3=1;
}
```

C语言程序，就是这种函数的汇集。就像使电机正转、反转函数一样，是把一个做大量工作的程序作为函数命名定义的。要使函数运行，就要在想运行的位置表示出想运行的函数名。为了便于理解函数的定义和运行，可以只把使电机正转程序组合起来试一试。另外，在C语言中，main () 这个函数是个特别的函数：程序运行时，一定是先执行main () 函数。

以后的程序单，可以在株式会社ohmsha (http://www.ohmshco.jp/) 的网页中下载。

程序单5.1 电机的正转程序

```
#include<3694.h>          ←——读3694.h这个文件
                              这是一个有各种定义且能把程序简单表述出来的文件

void init_port8(void);←——在程序中，把定义的函数名在此处声明
void motor1_cw(void);        本程序中对左边的2个函数进行了定义


void main(void){          ←——因是main()函数，最先从此处开始运行
  init_port8 ( );         ←——执行init-port8()函数
  motor1_cw ( );          ←——执行motor1-cw()函数

}

void init_port8(void){←——定义函数名为init_port8()的函数
  IO.PCR8=0xff;              使用I/O端口时，有时要进行必要的处理
                             先把程序按原样输入，等习惯以后再按说明加以理解

  IO.PDR8.BYTE=0xc0;
}

void motor1_cw(void){  ←——定义函数名为inotor1-cw()的函数
  IO.PDR8.BIT.B1=0;
  IO.PDR8.BIT.B3=0;
  IO.PDR8.BIT.B0=1;
  IO.PDR8.BIT.B2=1;
}
```

微机与计算机使用RS232C通信，如图5.84所示。如果把

```
#include<sci.c>
```

表述在程序开头的话，则不可以利用为RS232C通信所预备的函数。

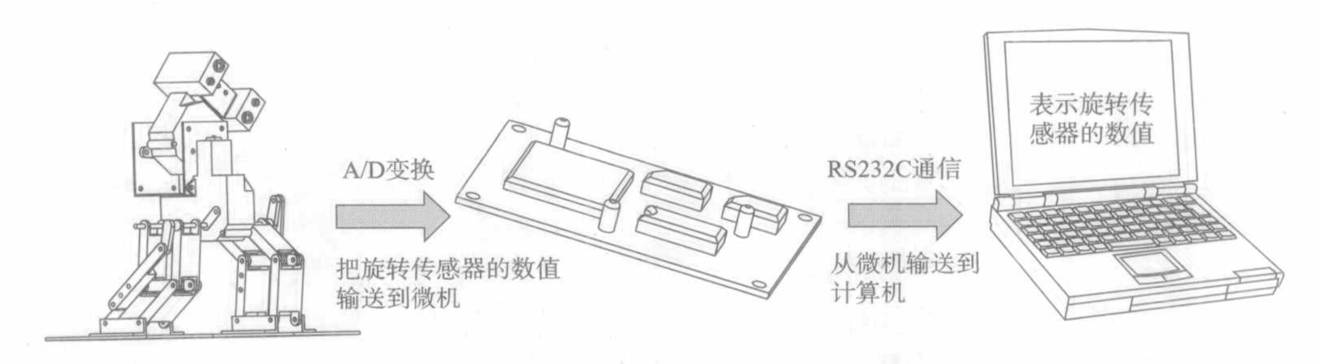


图5.84 微机和计算机使用RS232C通信

例如，往计算机屏幕上输入“sensorl”文字列后，A/D变换端口上连接的旋转传感器的数值便被输入到微机，计算机屏幕上显示出来的程序如下：

```
ad_scan_init(); ←———— 使A/D转换器能够使用而进行处理的函数
  InitSCI3(br57600);←—— 使串行端口能够使用而进行处理的函数
                         br57600是指1秒钟以57600存储单元通信
```

```
while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);←—— 等待A/D变换结束的处理
  rs_puts("¥r¥nsensor1=");  ←—— 向计算机输入()内字符串的函数
                                现正输入¥r¥nsensor1=字符串，¥r¥n是
                                改行的意思
```

```
rs_puts(IntToDec(AD.ADDRA>>8,3,str_ad));
                 ↑—— Int To Dec()函数把变换成3位的字符串传送
                     到计算机。A/D变换后的值为数值，但int To
                     Dec()函数是把数值变换为字符串函数，这是一
                     种独特的表述方法，在C语言中经常使用。先把
                     程序按原样输入，等习惯之后再更改内容
```

计算机和微机通信对机器人进行控制的程序刊载于程序单5.2。

程序单5.2　计算机和微机通信对机器人进行控制

```
#include<3694.h>
#include<sci.c>
//5syou _ v3 _ ad _ sirial _ menu.c
```

```
void init _ port8(void);
void init _ port5(void);
void motor1 _ cw(void);
void motor1 _ break(void);
void motor1 _ stop(void);
void motor1 _ ccw(void);
void motor2 _ cw(void);
void motor2 _ break(void);
void motor2 _ stop(void);
void motor2 _ ccw(void);
void ad _ scan _ init(void);

#define MIGIMAE 67
#define HIDARIMAE 221
#define TYURITU 104

unsigned char str _ ad[20],zero _ flg=0,zero _ kai=0,iti _ kai=0;
//
void main(void){
 char c;

 init _ port8();
 init _ port5();
 InitSCI3(br57600);
 ad _ scan _ init();
 while(1){
   rs _ puts("¥r¥n");
   rs _ puts("[Menu]  1:m1F 2:m1B 3:m1BK 4:m2F 5:m2B 6:m2BK 7:SEN1
8:SEN2 9:MENU2");
   rs _ puts("¥r¥n");
   do{
    c=rs _ getc();
   }while(c<'0'||c>'9'); 表示//rs _ getc()不是0～9的话，继续接收串行数据
switch(c){
  case '1':
    motor1 _ cw();
    break;
  case '2':
    motor1 _ ccw();
    break;
```

```
case '3':
  motor1_break();
  break;
case '4':
  motor2_cw();
  break;
case '5':
  motor2_ccw();
  break;
case '6':
  motor2_break();
  break;
case '7':
  while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
  rs_puts("¥r¥nsensor1=");
  rs_puts(IntToDec(AD.ADDRA>>8,3,str_ad));
  break;
case '8':
  while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
  rs_puts("¥r¥nsensor2=");
  rs_puts(IntToDec(AD.ADDRB>>8,3,str_ad));
  break;
case '9':
  break;
default:
        ;
}//MENU1 switch(c)结束
}
}

//Motor1正转
void motor1_cw(void){
 IO.PDR8.BIT.B1=0;
 IO.PDR8.BIT.B3=0;
 IO.PDR8.BIT.B0=1;
 IO.PDR8.BIT.B2=1;
}

//Motor1刹闸
void motor1_break(void){
```

```
  IO.PDR8.BIT.B0=0;
  IO.PDR8.BIT.B1=0;
  IO.PDR8.BIT.B2=1;
  IO.PDR8.BIT.B3=1;
}

//Motor1 停止
void motor1 _ stop(void){
  IO.PDR8.BIT.B0=0;
  IO.PDR8.BIT.B1=0;
  IO.PDR8.BIT.B2=0;
  IO.PDR8.BIT.B3=0;
}

//Motor1 反转
void motor1 _ ccw(void){
  IO.PDR8.BIT.B0=0;
  IO.PDR8.BIT.B2=0;
  IO.PDR8.BIT.B1=1;
  IO.PDR8.BIT.B3=1;
}

Motor2 正转
void motor2 _ cw(void){
  IO.PDR5.BIT.B1=0;
  IO.PDR5.BIT.B3=0;
  IO.PDR5.BIT.B0=1;
  IO.PDR5.BIT.B2=1;
}

//Motor2 刹闸
void motor2 _ break(void){
  IO.PDR5.BIT.B0=0;
  IO.PDR5.BIT.B1=0;
  IO.PDR5.BIT.B2=1;
  IO.PDR5.BIT.B3=1;
}

//Motor2 停止
void motor2 _ stop(void){
```

```
  IO.PDR5.BIT.B0=0;
  IO.PDR5.BIT.B1=0;
  IO.PDR5.BIT.B2=0;
  IO.PDR5.BIT.B3=0;
}

//Motor2 反转
void motor2_ccw(void){
  IO.PDR5.BIT.B0=0;
  IO.PDR5.BIT.B2=0;
  IO.PDR5.BIT.B1=1;
  IO.PDR5.BIT.B3=1;
}

void init_port8(void){
  IO.PCR8=0xff;              //把端口8(80～87)设置为输出
  IO.PDR8.BYTE=0xc0;         //LED OFF MOTOR1 OFF:0xc0
}

void init_port5(void){
  IO.PCR5=0xff;              //把端口5(50～57)设置为输出
  IO.PDR5.BYTE=0xc00;        //MOTOR2 OFF:0x00
}

//A/D变换scan-mode初始化
void ad_scan_init(void){
  AD.ADCSR.BIT.ADST=0;   //A/D变换停止
  AD.ADCSR.BIT.SCAN=1;   //SCAN MODE
  AD.ADCSR.BIT.CKS=1;    //高速变换
  AD.ADCSR.BIT.CH=1;     //指定AN0-AN1连续扫描,AN0-AN3=3
  AD.ADCSR.BIT.ADST=1;   //A/D变换开始
}
```

5.5.2 程序的输入

装载着微机的双足步行机器人，是由输入的程序控制的。除了在本书中使用的C语言之外，还有几种程序语言。无论使用何种语言编程，对微机来说能理解的只有机械语，因此所编写的程序要翻译成机械语之后再输送给

微机。要编写程序就需要编译软件，以及其他各种软件。总的来说，所需要的软件最少有以下3种。

①编辑：在计算机上编写程序的软件。

②编译：把写好的程序翻译成机械语的软件。

③烧写：把翻译成机械语的程序写入微机的软件。

GCC DeveloPer Lite软件兼有这3种功能，是Best Technology公司的免费软件，可以在WinDows上编辑和编译源文件，并可利用配套的输入工具向微机输入，非常方便。

其具有初学者也能轻松使用的开发环境，就利用这个GCC DeveloPer Lite来编写程序吧。

用GCC DeveloPer Lite编写程序的顺序如下：

①在计算机中安装GCC DeveloPer Lite。

↓

②在GCC DeveloPer Lite的编辑页输入程序。

↓

③用GCC DeveloPer Lite编译程序。

↓

④把翻译成机械语言的程序用GCC DeveloPer Lite写入微机。

↓

⑤执行输入到微机上的程序。

Best Technolgy公司的网页上（http://besttechnology.co.jp）即可下载到GCC DeVeloPer Lite软件。下载结束后，保存在桌面上，双击GCC DeveloPer Lite Setup图标即可安装。其安装步骤如图5.85所示。

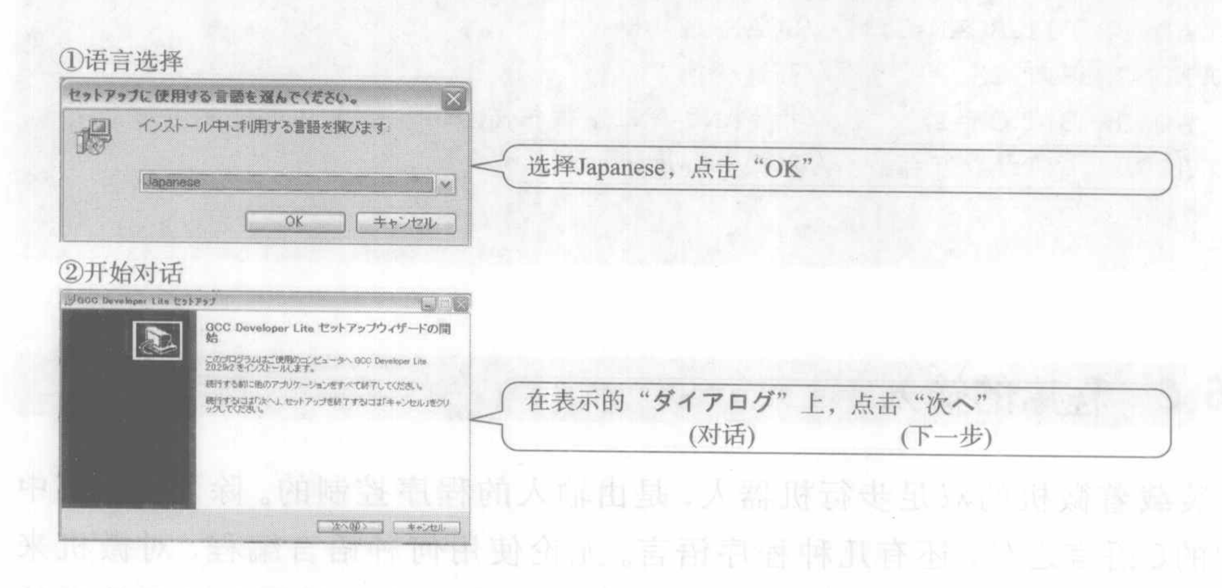
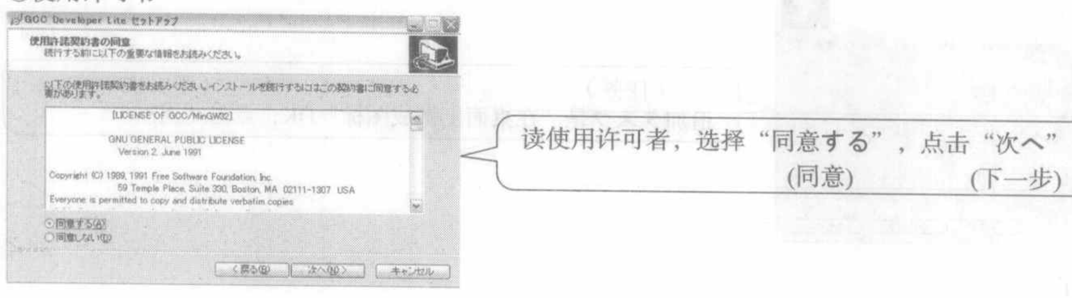


图5.85 GCC DeveloPer Lite的安装步骤

③使用许可书

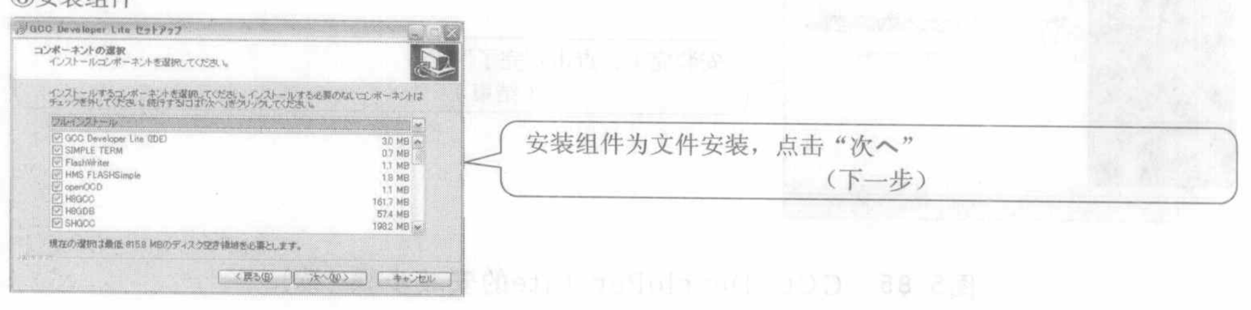




④信息表示



⑤安装地点



⑥安装组件

安装组件为文件安装，点击“次へ”
(下一步)

⑦指定程序组别

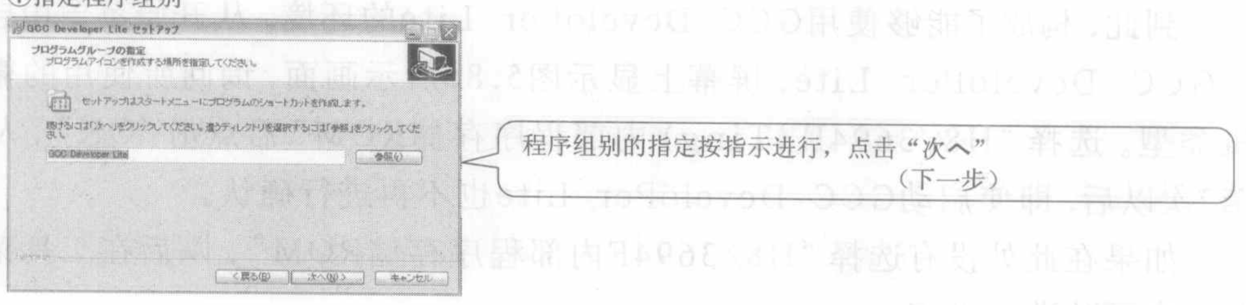
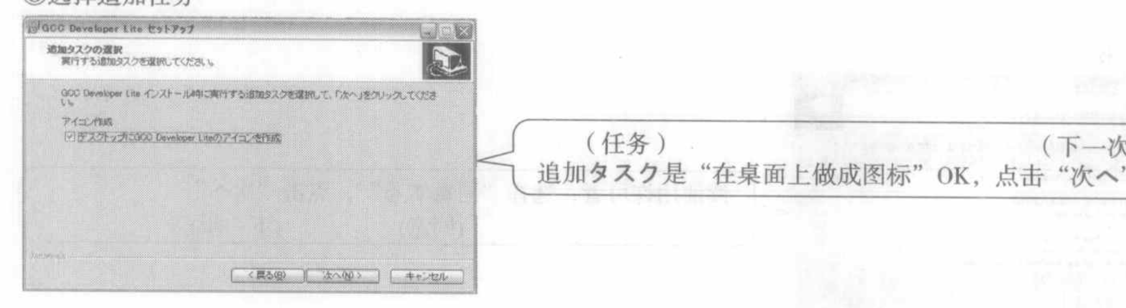
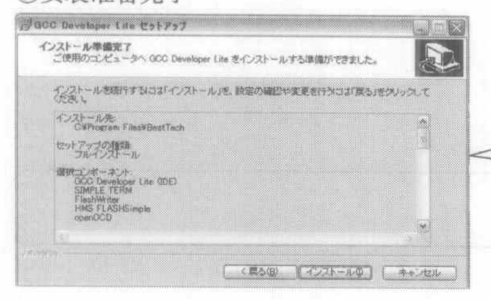


图5.85 GCC DeveloPer Lite的安装步骤（续）

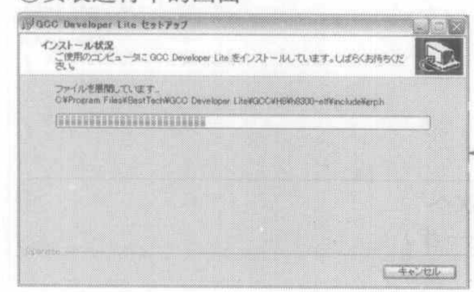
⑧选择追加任务



⑨安装准备完了



⑩安装进行中的画面



⑪完了

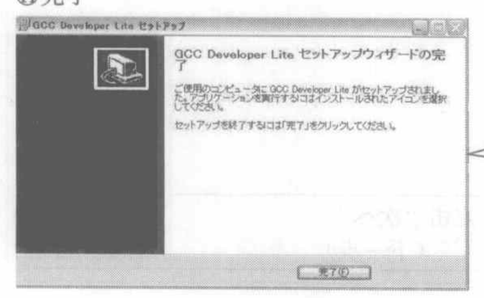
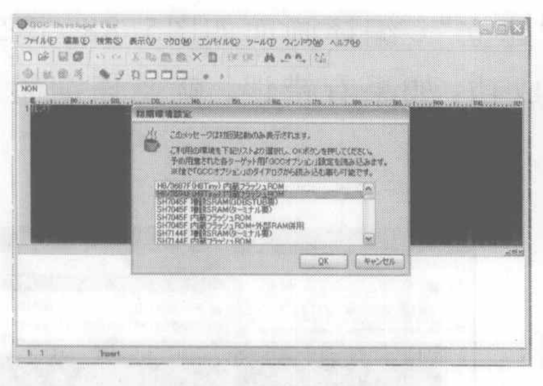
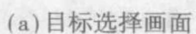


图5.85 GCC DeveloPer Lite的安装步骤（续）

到此，构成了能够使用GCC DeveloPer Lite的环境。从开始菜单中启动GCC DeveloPer Lite，屏幕上显示图5.86所示画面，询问所使用的微机类型。选择“H8/3694F（Ting）内部程序存储ROM”后点击“OK”，从第2次以后，即使启动GCC DeveloPer Lite也不再进行确认。

如果在此处没有选择“H8/3694F内部程序存储ROM”，以后在工具菜单里也可以进行设定。




(a)目标选择画面

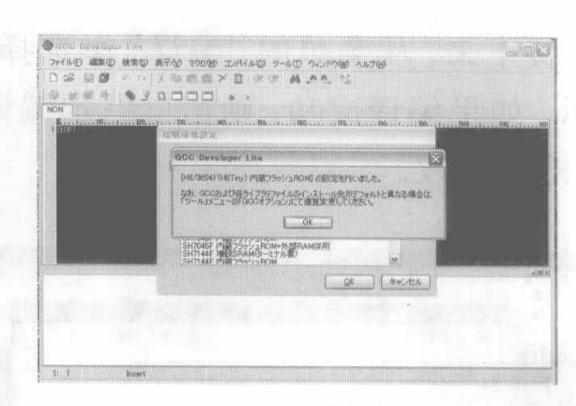

(b)目标选择确认

图5.86 GCC DeveloPer Lite开始前的设定

图5.87为编写程序时使用的画面。

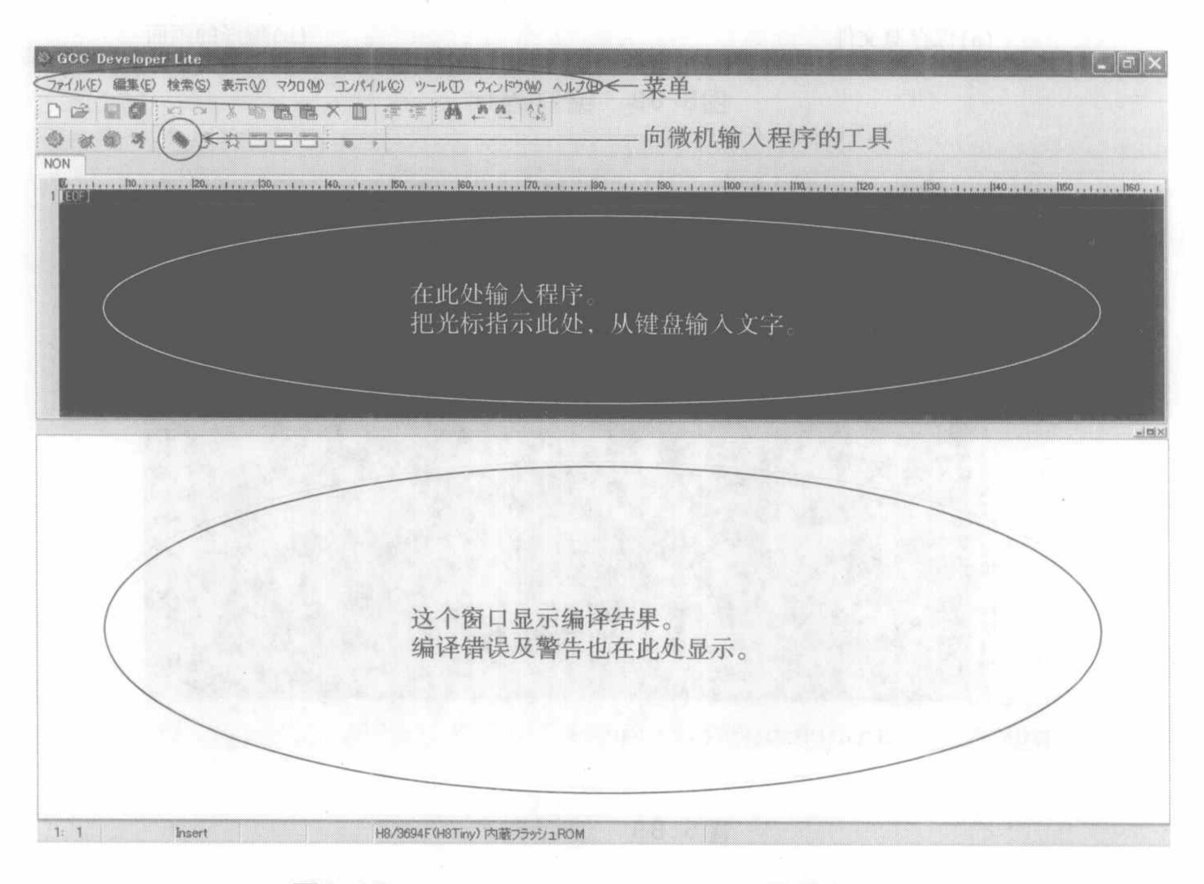
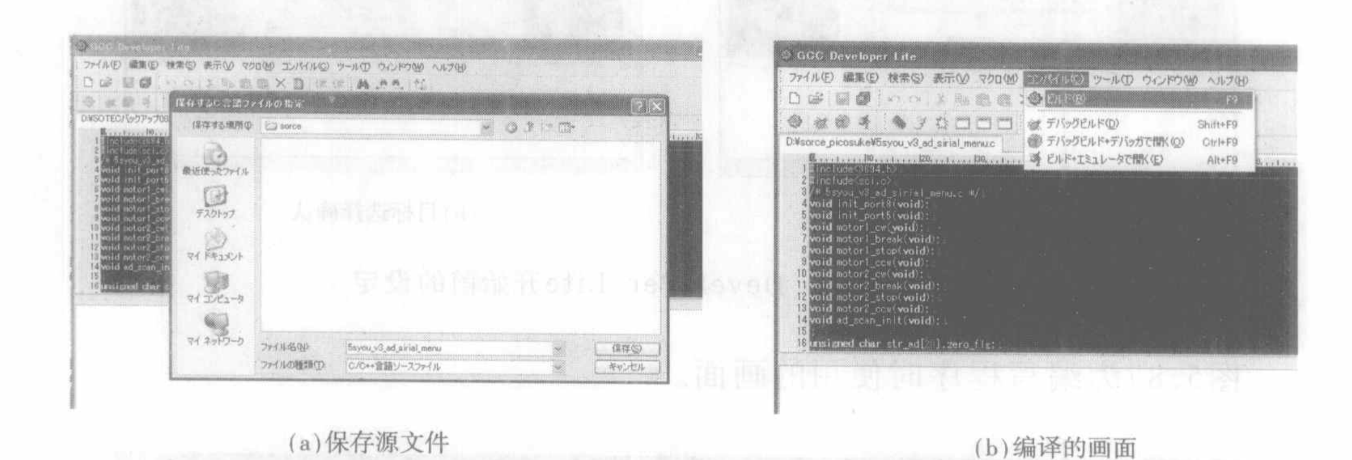


图5.87 GCC DeveloPer Lite开始的画面

在这个程序的输入画面上，把刚才的程序单5.2输入进去。除注释之外，程序为半角数字。

输入完了后，一定要保存。从菜单的“文件”里选择“文件名保存”，把文件名输入后，点击“OK”。预先选好保存地点，如果需要，可先新建文件夹。预先做好保存C语言源文件的文件夹以便于管理，文件名写上自已容易管理的名字。

接下来，从菜单的“编译”里选择“建立”，编译画面如图5.88、图5.89所示。如果编译成功，则窗口提示编译成功；如果有错误，就要仔细阅读内容、进行修改。



(a)保存源文件　　　　(b)编译的画面

图5.88　编写程序

图5.89　编译完了

经常出现的错误如下。

①半角为全角。程序为半角数字，之中如掺杂全角数字的话，则成为错误。

②分号“;”遗漏，函数的最后的“}”遗漏。

③注释行/**/及//不齐全。

把事先制作的电缆线RS232C连接器插入计算机的RS232C连接口，立体插头插入微机侧的立体微型插口。

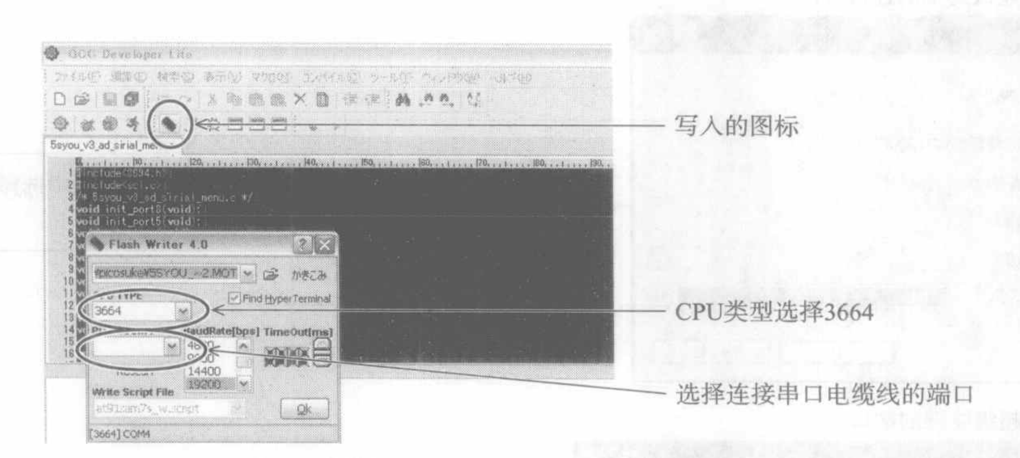
编译成功后，把机械语言的程序写入微机。如图5.90所示，点击写入程

序的图标，写入程序便被启动。此时，写入程序的目标应该为3664，如果不是的话，则按下述方法把目标变为3664。

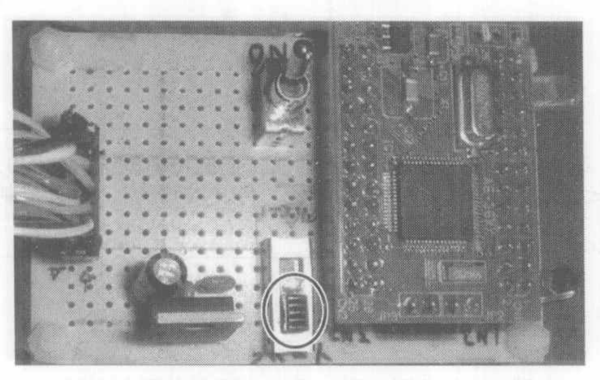
在Flash writer4.0栏中，点击右键显示菜单，选择菜单中的“FW环境设定”，在“CPU类型”项上点击“3664”，设定结束。另外，COM端口是与串行电缆线相连接的端口号。端口的选择要正确。

接下来，把微机侧的拨动开关拨到启动侧，把电源开关打在ON（闭合）位置，点击“写入”，则开始向微机写入程序。

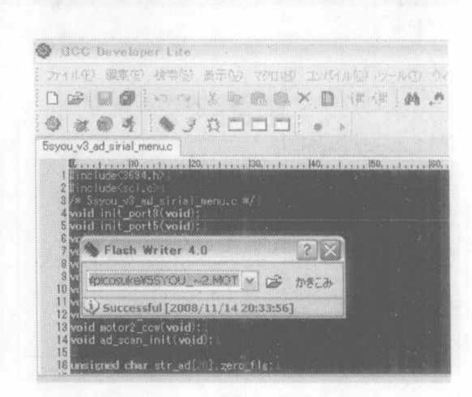
写入结束后，把微机的电源开关打在OFF（断开）位置。



(a)启动写入



(b)把拔动开关拔到启动侧，把电源开关ON(闭合)



(c)写入成功

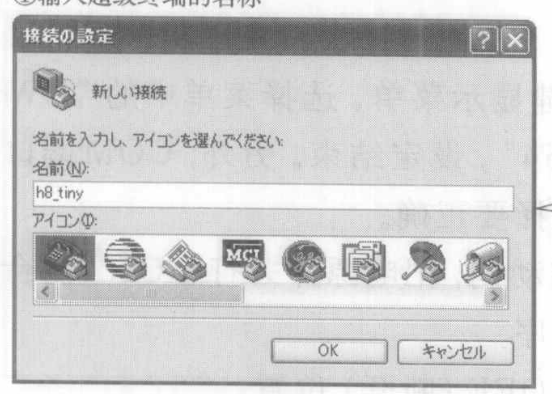
图5.90　写入程序

5.5.3 程序的执行

请再次检查一下程序和电路有无错误，特别是与电机驱动程序有关的错误，有时会损坏电机驱动程序。如无错误，可以执行。

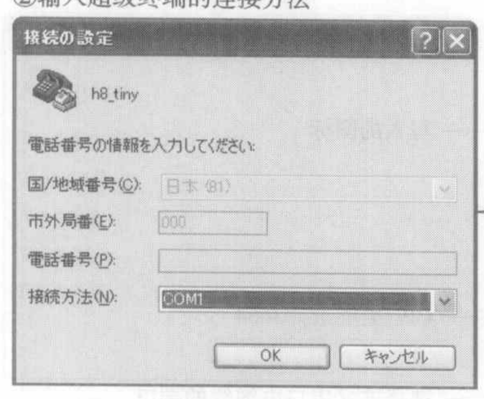
因是微机和计算机的通信，所以要先把计算机启动起来。按图5.91所示步骤设置与微机通信软件“超级终端”。

①输入超级终端的名称



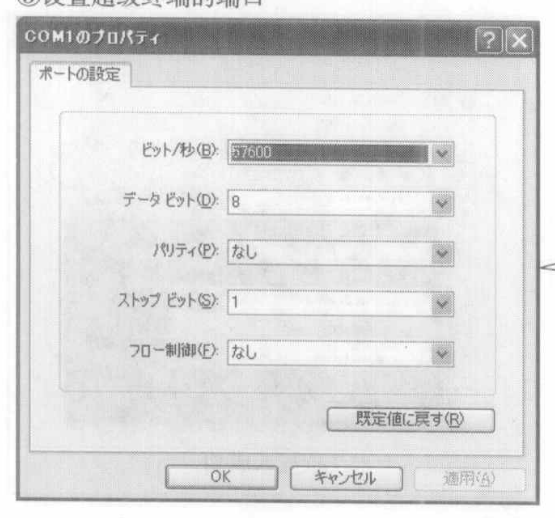
开始 → 所有程序 → 附件 → 通信 → 超级终端
在①的画面上，名称输入h8_tiny，点击“OK”。

②输入超级终端的连接方法



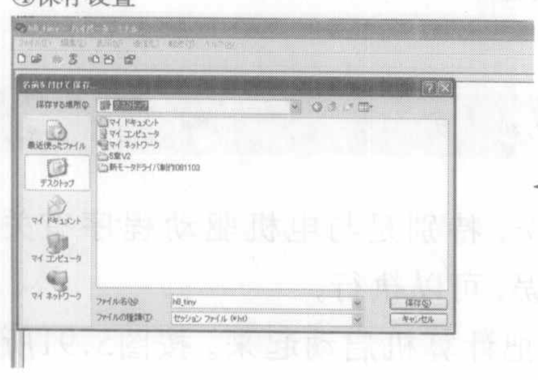
连接方法上选择连接串口端口的号，在图中选择了COM1。

③设置超级终端的端口



接下去，是端口的设置画面，把波特率设置为57600，数据波特为8，奇偶性为无，停止波特为1，流量控制为无，点击“OK”。

④保存设置



这样，启动超级终端，保存设定。从菜单的“文件”里选择“保存在…”。

图5.91　超级终端的设置

从下次开始，当点击桌面上的图标时，超级终端将被启动。超级终端启动后，将执行微机。执行微机时，要把微机的拨动开关拨向正常侧，使电源闭合（ON），如图5.92所示。于是，在超级终端的画面上，将显示出下列从微机送来的字符：

```
[Menu]  1:m1F 2:m1B 3:m1BK 4:m2F 5:m2B 6:m2BK 7:SEN1 8:SEN2 9:MENU2
```

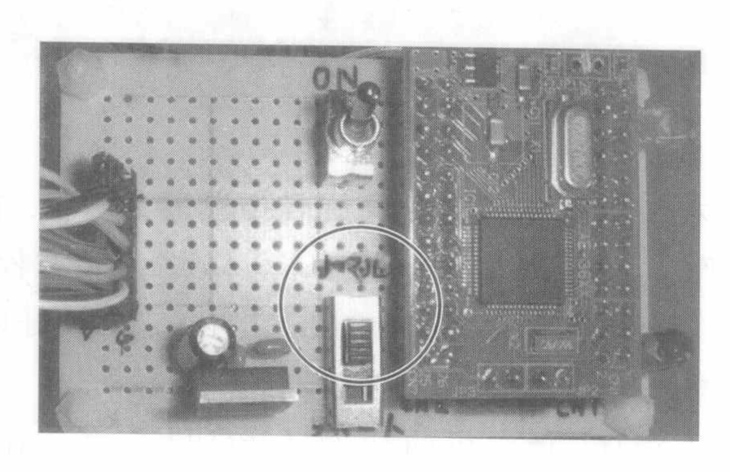


图5.92 使线路板在正常侧，电源ON（闭合）

根据这个菜单，当从键盘输入1～9的数字时，便被微机发射、处理。看看源程序单5.2就会明白，Menu的各项动作如下：

1的m1F是脚电机的正转
2的m1B是脚电机的反转
3的1BK是脚电机的制动器
4的m2F是重心倾斜电机的正转
5的m2B是重心倾斜电机的反转
6的m2BK是重心倾斜电机的制动器
7的SEN1是把脚转动传感器的值向计算机的超级终端发送
8的SEN2是把重心倾斜转动传感器的值向计算机的超级终端发送
9的MENU2为今后扩展用

若输入数字键的7，屏幕画面上则会出现像SENSOR1=123一样，把脚电机旋转传感器的值用3位数显示出来。

接着输入数字1，则脚电机转动；停止时，则要输入数字键的3。再次输入数字7，则屏幕画面上显示SENSOR1=200，值会变大变小呢！这是因为随着旋转传感器的转动，出现了所对应的变化值。

那么，为了用微机控制双足步行机器人，就必要把脚的位置和重心倾斜的位置登记到程序中去，在程序单5.2中的下列3行（程序单5.3）就是登记在程序中的部分。

程序单5.3

```
#define MIGIMAE 67          …①右脚在前方位置时的旋转传感器的值
#define HIDARIMAE 221       …②左脚在前方位置时的旋转传感器的值
#define TYURITU 104         …③重心倾斜在中心位置时的旋转传感器的值
```

接下来，将确定这些数值。

首先，确定①右脚在前方位置时的旋转传感器的数值。接着刚才的程序输入数字1，脚动作了。当右脚向前迈出后，输入数字3使它停止。如果失败，则反复重复几次，直到使它能做出右脚在前的状态。做好以后再输入数字7，使旋转传感器的数值显示出来，并把此数值记录下来。

此时，暂停一下程序，把微机的开关打开OFF位置，结束超级终端。点击超级终端的画面右上的“×”就可结束。

启动GCC DeveloPer，读程序。变更程序中的

```
#define MIG1MAE67
```

例如，现在为“67”，把“67”用刚才记录下来的数值替换。注意：要用半角输入，替换后保存。

接着，确定②左脚在前方位置时的旋转传感器的值。再次双击桌面上的H8/Ting图标，超级终端启动后把微机的开关打向ON，在显示出的菜单里输入数字1，脚动作。当左脚向前迈出后，输入数字3使它停止。如果失败，则反复重复几次，直到使它做出左脚在前的状态。做好以后再输入数字7，使旋转传感器的数值显示出来。和刚才一样，把显示出来的旋转传感器的值替换：

```
#define HIDARIMAE221
```

其中的221，注意用半角输入。

最后确定③重心倾斜在中心位置时的旋转传感器的值。和刚才一样，在显示的菜单里输入数字4或5等，使重心倾斜的位置处于中间位置（既不偏左又不靠右的位置）。当处于中间位置时，输入数字3使它停止。如果失败，则反复重复几次，直到使它处在中间状态。做好以后输入数字8，显示传感器的数值，把此数值替换：

```
#define TYURITU 104
```

其中的104，注意要用半角输入。

以上是用程序控制本书中的双足步行机器时最重要的部分。

1.不定值区的避免方法

本书中的机器人使用的电阻式旋转传感器为360°转动，由于旋转传感器的输出值是不连续的，所以进行控制时要充分理解这个特点后再使用。

使电机转动，连续输出旋转传感器的值，此值的输出范围在0～255之间。如果输出的值是连续的话，则为0·1·2·3…254·255·0·1·2·3…；如果使用的旋转传感器为RDC803001A，则输出的数值为0·1·2·3……254·255·□·△·◇·0·1·2·3…□·△·◇为不定值，虽然传感器在360°之间转动，但也有无电阻的区域，当传感器通过此区时，其输出值便为不定值。

编程时，有不定值的时候，所以有必要先理解旋转传感器的特性。

例如，当腿部的移动传感器的数值为170时，表示重心向右倾斜，假设有步行控制的程序存在。当传感器的值由168·169·170（逐渐增加到170）时，表明正在正确地控制着重心向右倾斜。但是，旋转传感器的输出值为253·254·255后进入不定值区，也有可能输出170，此时虽然传感器的值为170，如果重心向右倾斜的话，则不能正确控制。

因此，编程时要设法避开旋转传感器输出值的不定值区。现有2种方法。

①当重心倾斜的齿轮箱处于中间状态（不偏左也不偏右）时，使传感器的值在128附近（传感器的中间值），安装长螺丝通过传感器的位置。在程序单5.3中，此值为104，如果以此值为标准的话，即便重心往左、往右倾斜，传感器上的值=中间值±60=104±60=44~164，这样便可以避开不定值区。

②如果在脚部安装旋转传感器，因此处的传感器要转动1圈，故其输出值是不可能避开不定值区的。采取的方法是，如果旋转传感器在向数值增加的方向转动（双足步行机器人前进的方向），则输出的值为…

254·255·□·△·◇·0·1，经过不定值区时，一旦确认输出值为0就等待准确的数值；若传感器在向数值减少的方向转动（后退方向），则输出数值为…3·2·1·0·□·△·◇·255·254…，经过不定值区时，一旦确认输出值为255就要等待准确的数值。

因此，对程序单5.3的部分，如果接近本书的值，要变更程序的话，只要变更程序单5.3的部分即可。在旋转传感器的安装说明处（图5.26、图5.33），也涉及旋转传感器长螺丝平坦部加工部分的方向问题，此处的安装位置决定了程序单5.3的值。

2.脚部旋转传感器的调整

如果对程序有自信的话，在理解了方法①和②后，可根据旋转传感器的安装位置变更程序；如果对程序还不太熟练，则可以通过调整机器人本体来达到程序单5.3的值，方法如下。

先启动超级终端，使写入了程序单5.2的微机执行。

脚部旋转传感器的调整如下。

①从菜单中输入7，使传感器的值显示出来。如果不是221的话，再从菜单里输入1，使脚部电机转动。转动到适当位置时输入3，使它停止。从菜单里输入7，确认传感器的值。这样反复操作，直到把传感器的值调到221为止。

②旋转传感器的值为221停止后，调整机器人脚的位置。先用六角扳手（齿轮箱的配件）拧松作为脚齿轮箱轴的六角螺丝，如图5.93所示。

要使脚能自由活动，使左脚在前（图5.94）。此时，要注意不要使旋转传感器转动。当左脚在前时，再把刚才拧松的螺丝旋紧固定。

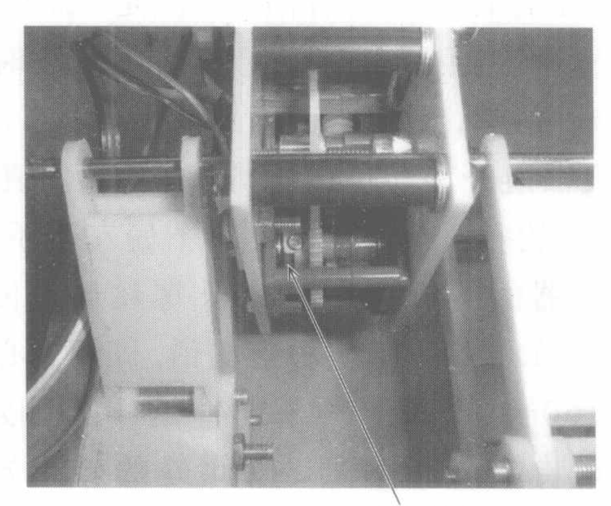
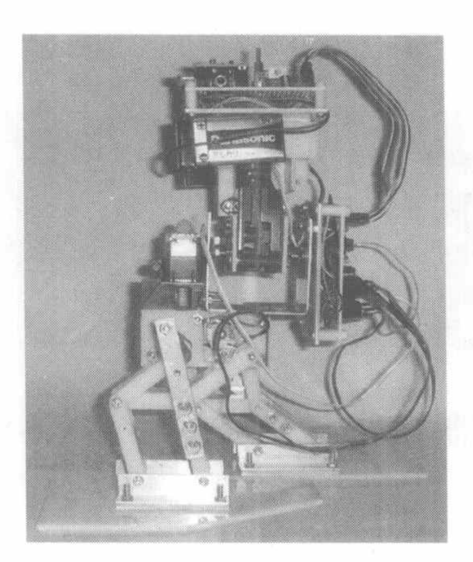
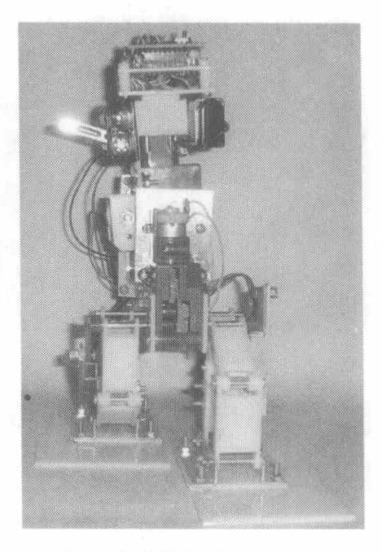


图5.93　齿轮箱的六角螺丝



(a)转动传感器值为211时的状态



(b)转动传感器值为104时的状态

图5.94 由旋转传感器值调整状态

至此，脚部旋转传感器调整完毕。

3.重心倾斜传感器的调整

重心倾斜传感器的调整方法与脚部旋转传感器相同，如下。

①从菜单中输入8，使传感器的值显示出来。如果不是104的话，再从菜单里输入4或5使重心倾斜电机转动。转动到适当位置时输入6，使它停止。从菜单里输入8，确认传感器的值。这样反复操作，直到把传感器的值调到104为止。如果难以调节的话，可以从机器人身上卸下来进行调节（注意：不要拆掉电线）。

②调整重心倾斜齿轮箱。先用六角扳手拧松作为重心倾斜齿轮箱轴用的六角螺丝，齿轮箱能自由活动，曲柄臂杆处于水平位置。此时要注意，不要使旋转传感器转动，曲柄杆成水平位置以后，再用刚才的螺丝重新固定好。

到此，重心倾斜传感器的调整完毕。

4.实现双足步行的程序

现在，为实现双足步行的零件编写程序。在重心倾斜上，必要的函数有以下4个：

```
void keisya _ migi(void);     //在没有向右倾斜的前提下，使重心向右倾斜的函数
void keisya _ hidari(void);  //在没有向左倾斜的前提下，使重心向左倾斜的函数
void tyuritu _ hidari(void);//在右倾斜的前提下，向左倾斜到中间状态的函数
void tyuritu _ migi(void);   //在左倾斜的前提下，向右倾斜到中间状态的函数
```

使脚动作的必要的函数有以下4个：

```
void mae _ hidari(void);    //以右脚在前为前提，向前迈左脚的函数
void mae _ migi(void);      //以左脚在前为前提，向前迈右脚的函数
void usiro _ migi(void);    //以左脚在后为前提，向后迈右脚的函数
void usiro _ hidari(void);  //以右脚在后为前提，向后迈左脚的函数
```

如前所述，脚部电机的旋转传感器，因其输出值有时处于不定值区，所以必要的函数有2个：

```
void mati _ zero(void);//前进电机转动(传感器值增加)等待"0"通过的处理函数
void mati _ 255(void); //后退电机转动(传感器值减少)等待"255"通过的处理函数
```

步行的基本函数有以下4个：

```
void Rkei _ Lmae(void);     //从右脚在前的状态中向右倾斜，向前迈左脚的函数
void Lkei _ Rmae(void);     //从左脚在前的状态中向左倾斜，向前迈右脚的函数
void Rkei _ Lusiro(void);   //从右脚在后的状态中向右倾斜，向后迈左脚的函数
void Lkei _ Rusiro(void);   //从左脚在后的状态中向左倾斜，向后迈右脚的函数
```

各函数的定义如下：

```
//在没有向右倾斜的前提下，使重心向右倾斜
void keisya _ migi(void){
  //→右倾斜
  ad _ scan _ init();
  motor2 _ cw();
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
   AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
   while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
//右倾斜的停止位置：TYURITU-20
   if((AD.ADDRB>>8)==(TYURITU-20)iti _ kai++;
  }
```

```
    iti _ kai=0;
    motor2 _ break();
}
//在没有向左倾斜的前提下,使重心向左倾斜
void keisya _ hidari(void){
    //→左倾斜
    ad _ scan _ init();
    motor2 _ ccw();
    iti _ kai=0;
    while(iti _ kai!=10){
     AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
     while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
    //左倾斜的停止位置:TYURITU+35
    if((AD.ADDRB>>8)==(TYURITU+35)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
  motor2 _ break();
}

//在右倾斜的前提下向左倾斜到中间状态
void tyuritu _ hidari(void){
    //→左倾斜到中间状态
    motor2 _ ccw();
    iti _ kai=0;
    while(iti _ kai!=10){
     AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
     while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
     //只有8比TYURITU提前刹车
     if((AD.ADDRB>>8)==(TYURITU-8)iti _ kai++;
    }
    iti _ kai=0;
    motor2 _ break();
}

//在左倾斜的前提下向右倾斜到中间状态
void tyuritu _ migi(void){
    //→右倾斜到中间状态
    motor2 _ cw();
    iti _ kai=0;
    while(iti _ kai!=10){
```

```
    AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
    while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
    //只有8比TYURITU提前刹车
    if((AD.ADDRB>>8)==(TYURITU+8)iti _ kai++;
}
  iti _ kai=0;
  motor2 _ break();
}

//以右脚在前为前提，向前迈左脚
void mae _ hidari(void){
  //向前迈左脚
  motor1 _ cw();
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
    AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
    while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
    if((AD.ADDRA>>8)==HIDARIMAE)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
  motor1 _ break();
}

//以左脚在前为前提，向前迈右脚
void mae _ migi(void){
  //向前迈右脚
  motor1 _ cw();
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
    AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
    while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
  if((AD.ADDRA>>8)==MIGIMAE)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
  motor1 _ break();
}

//以左脚在后为前提，向后迈右脚
void usiro _ migi(void){
  //向后迈右脚
```

```
  motor1 _ ccw();
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
   AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
   while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
  if((AD.ADDRA>>8)==HIDARIMAE)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
  motor1 _ break();
}

//以右脚在后为前提,向后迈左脚
void usiro _ hidari(void){
  //向后迈左脚
  motor1 _ ccw();
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
   AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
   while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
  if((AD.ADDRA>>8)==MIGIMAE)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
  motor1 _ break();
}

//前进电机转动(传感器值增加),等待"0"通过,但不停止
void mati _ zero(void){
  motor1 _ cw();
  //先等待传感器数值="0"
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
   AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
   while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
   if((AD.ADDRA>>8)==0)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
}

//后退电机转动(传感器值减少),等待"255"通过,但不停止
void mati _ 255(void){
```

```
  motor1 _ ccw();
  //先等待传感器数值为=255
  iti _ kai=0;
  while(iti _ kai!=10){
   AD.ADCSR.BIT.ADF=0;
   while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
  if((AD.ADDRA>>8)==225)iti _ kai++;
  }
  iti _ kai=0;
}

//从右脚在前的状态中向右倾斜,向前迈左脚的函数
void Rkei _ Lmae(void){
  //在没有向右倾斜的前提下,使重心向右倾斜
  keisya _ migi();
  //以右脚在前为前提,向前迈左脚
  mae _ hidari();
  //以右倾斜为前提,向左倾斜到中间状态
  tyuritu _ hidari();
}

//从左脚在前的状态中向左倾斜,向前迈右脚的函数
void Lkei _ Rmae(void){
  //在没有向左倾斜的前提下,使重心向左倾斜
  keisya _ hidari();

  //向前迈右脚:传感器值从左脚在前时的"221"增加到右脚在前"67"的期间有"0"出现
  //前进电机转动(传感器数值增加),等待"0"通过
  mati _ zero();
  //让"0"通过后,等待MIGIMAE的位置
  //以左脚在前为前提,向前迈右脚
  mae _ migi();

  //以左倾斜为前提,向右倾斜到中间状态
  tyuritu _ migi();
}

//从右脚在后的状态中,向右倾斜,向后迈左脚的函数
void Rkei _ Lusiro(void){
  //在没有向右倾斜的前提下,使重心向右倾斜
```

```
  keisya _ migi();
  //以右脚在后的状态为前提,向后迈左脚
  usiro _ hidari();

  //以右倾斜状态为前提,向左倾斜到中间位置
  tyuritu _ hidari();
}

//从左脚在后的状态中向左倾斜,向后迈右脚的函数
void Lkei _ Rusiro(void){
  //在没有向左倾斜的前提下,使重心向左倾斜
  keisya _ hidari();

  //向后迈右脚:传感器值从左脚在后的"67"减少到右脚在后时的期间内,有"255"出现
  //后退电机转动(传感器值减少),等待"255"通过
  //使"255"通过后,等待HIRDARIMAE的位置
  mati _ 255();
  //以左脚在后的状态为前提,向后迈右脚
  usiro _ migi();

  //以左倾斜的状态为前提,向右倾斜到中间状态
  tyuritu _ migi();
}
```

把函数进行组合后,可以编写前进直线步行、后退直线步行、前进右转弯、后退右转弯的程序。

例如,前进直线步行的函数可以由以下函数组成:

```
//直线前进步行的函数,从左脚在前开始
void walk _ zensin (unsigned char hosu){
  unsigned int i;
  for (i=1; i<=hosu;i++){
    Lkei _ Rmae();
    Rkei _ Lmae();
  }
}
```

步数是作为“参数”处理的。例如,想前进3步时:

```
walk _ zensin(3);
```

另外，追加以0.25s为单位的等待时间的函数：

```
//时间A，钟表的时间单位为0.25s
void wait _ z(int sec2){
  int i;
  TA.TMA.BYTE=0x0a;
  for(i=0;i<=sec2;i++){
    while(IRR1.BIT.IRRTA==0);
    IRR1.BIT.IRRTA=0;
}
}
```

以上的程序追加在程序单5.2里。

把程序开头的函数追加在声明处，声明的顺序可以任定。追加函数定义时，可以在main（ ）{ }函数的后面任何地方，定义函数的顺序可以任定。

上述函数在程序单5.4中，把它编写在程序单5.2里的菜单里：

```
case '8':
       while(AD.ADCSR.BIT.ADF==0);
       rs _ puts("¥r¥nsensor2=");
       rs _ puts(IntToDec(AD.ADDRB>>8,3,str _ ad));
       break;
    case '9':
    在此处追加程序单5.4
       break;
    default:
            ;
    }//MENU1switch(c)结束
```

程序单5.4 追加Menu2的程序

```
rs _ puts("¥r¥n[Menu2]1:ZESIN 2:KOSIN ¥r¥n");
do{
  c=rs _ getc();
```

```
}while(c<'1'||c>'2');//rs-getc()如果不是1～2之间的数值的话，继续接收串行数据
switch(c){
case '1':
  wait _ a(12);
  walk _ zensin(3);
  break;
  case '2':
   wait _ a(12)
   walk _ kosin(3);  ←请参考walk _ zensin(),编写walk _ kosin().
                       如果这部分较难的话，也可空着，并不影响实验
   break;
  default:
        ;
  }//MENU2的Switch(c)结束
```

5.6 用微机自动控制进行步行实验

现在开始进行步行实验。使用在前节介绍的函数也可以编写转弯用的程序，也可以从株式会社ohmsha的网页中下载。

1.执行程序

双击计算机画面上的h8-ting图标，启动超级终端。把微机的拨动开关拨到正常侧，电源开关打开ON后，从微机传来下述文字：

```
[Menu]  1:m1F 2:m1B 3:m1BK 4:m2F 5:m2B 6:m2BK 7:SEN1 8:SEN2 9:MENU2
```

根据菜单的指示，从键盘上输入1～9的数字后，便被送入微机处理。

2.以左脚在前为前提

前进步行和后退步行都是以左脚在前为前提执行程序的，所以当右脚在前时要输入数字1。

也就是说，要使左脚、右脚都可以在前的话，还要追加能判断哪个脚在前的函数（在demo.C文件中，可以下载）：用menu选择9，移向步行程序的menu2。

左脚在前的状态下，从menu中输入数字9，于是，显示出“menu2”：

```
[Menu2]  1:zesin  2:KOSin
```

3.进行前进步行

输入数字13s后，开始前进步行。在等待的3s里，把连接计算机和微机的电线拆掉，便看到一边倾斜重心、一边向上抬起向前迈出的脚进行直线前进的双足步行的样子了。输入数字2的话，则进行后退步行。

4.改变步数

把程序中的walk_zensin(3)变成walk_zensin(5)后，便可以把3步的前进步行变成5步。

walk_zensin(3)中的 () 内的数字，在程序中是指步行的次数，(3) 是3步，(5) 是5步。

5.双重心倾斜进行调整

开始之前，先要参考P144“不定值区的避免方法①”。

当重心倾斜过大或过小时，要改变TYURITU+35或TYURITU-20的部分（在程序中函数keisya_hidari () 和keisya_migi () 中）。

尤其是当重心倾斜过小时，重心不能充分移动，向前迈出的脚在抬不起来的情况下进行3步行，因此不能达到直线步行。

在步行情况很好的情况下，也可以把重心倾斜调小试一试。从实验中可知，此时是不能很好地进行重心移动的。比如，可以把TYURITU+35变成TYURITU+10、把TYURITU-20变成TYURITU-10看看，步行的一定是向前迈出的脚没有抬起来。

6.调节脚位置的判定值

和上述相同，请参考P138“不定值区的避免方法②”。

有可能脚的位置和重心倾斜的时间不合，也会也现向前迈出的脚抬不起来而使机器人倒下的情况。此时要调节脚位置的判定值，可以改变下列数：

```
#define MIGIMAE69
#define HIDARIMAE221
```

例如，从右脚刚接地时的位置开始到左脚向前迈出之前，右脚都是在前方位置的。右脚的动作看上去并没有太大变化，但旋转传感器的数值却变化了很多。

这可以按以下方法进行确认：从“MENU”中输入数字1，使脚开始动作；再输入7，使传感器的数值显示出来。

MIGIMAE和HIDARIMAE的值是有幅度的，也可以说有改变的余地。因此，如果要对程序进行改良，可以在前进和后退上考虑改变MIGIMAE和HIDARIMAE的数值。

以上为前进和后退的实验，也用从下载的程序进行转弯的实验。

搭载微机的机器人，重心倾斜的时间和角度都是按照程序进行的，步行的步数也可以由程序进行改变，做到了使机器人成为能用各种程序进行控制的双足步行机器人。

也可以试着改变程序或者重新做一个新脚来试一试，充分体会由微机控制双足步行机器人的乐趣。

实验·理解

点亮LED

微机控制的基本是信号的输入和输出，信号是简单的“1”和“0”。用电压表示的话，信号的“0”就是0V，“1”便是5V。

在此，做一个最简单的实验：用输出信号使LED亮、灭。此实验因为简单易做，可以用作确认微机的动作和程序调整的信号。

在制作的AKI-H8/3694F扩展线路板上搭载有LED。由图5.38所示电路图可以看出，LED连接在AKI-H8/3694F的CH2的15号和16号上，微机端口为P86、P87。在使用说明里，有关于AKI-H8/3694F的连接号和微机端口的说明。

为了使LED点亮，从微机端口P86和P87上输出信号。例如，与端口P86连接的LED点亮时：

IO·PDR8·BIT·B6=0

表示端口P86输出信号0（用电压表示为0V）。

同样，与端口P86连接的LED灭时：

IO·PDR8·BIT·B6=1

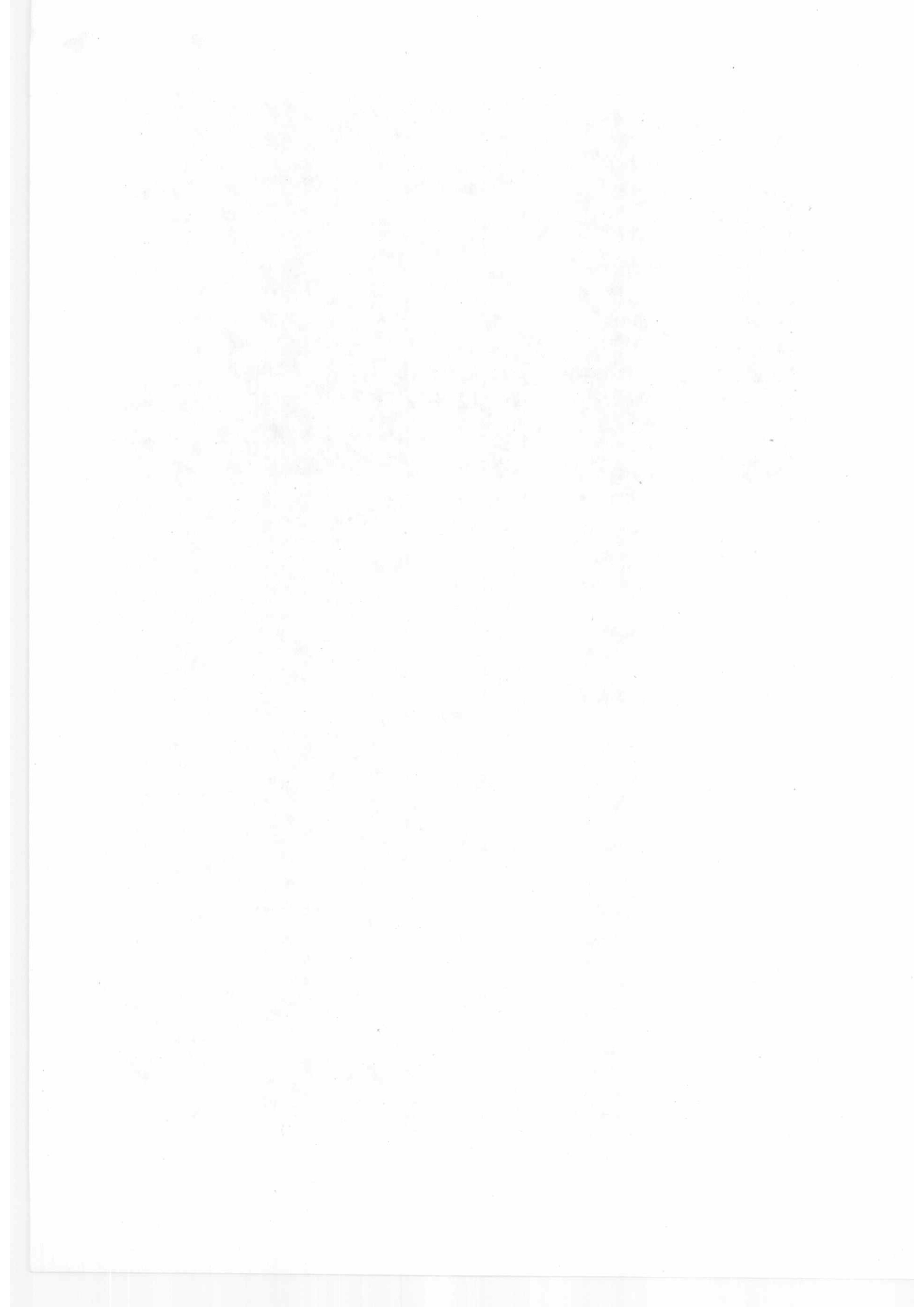
表示端口P86输出信号1（用电压表示为5V）。

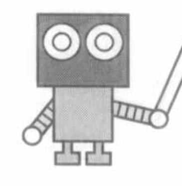
由微机执行以下程序时，LED将亮4s后灭。

注意：做此实验时，一定要把连接扩展线路板和电机前置放大器线路板的电线拔掉，或者把电机的电源关掉，这是为了防止从端口80～83上输出错误信号时损坏电机前置放大器。

```
#include<3694.h>
void wait _ a(int sec2);//时间A，指定单位为0.25s
void init _ port8(void);//有关端口8(P80～P87)的设定
void main(void){
  init _ port8();
  IO.PDR8.BIT.B6=0;      //LED1亮灯
  wait _ a(12);          //等待0.25sec×12=4sec
  IO.PDR8.BIT.B6=1;      //LED1灭灯
```

```
}
void init _ port8(void){
  IO.PCR8=0xff;                  //把端口8(80～87)设定为输出
  IO.PDR8.BYTE=0xf0;
}
void wait _ a(int sec2){
  int i;
  TA.TMA.BYTE=0x0a;
  for(i=0;i<=sec2;i++){
   while(IRR1.BIT.IRRTA==0);//因超出计数器，IRR1.BIT.IRRTA=1
   IRR1.BIT.IRRTA=0;           //IRRI.BIT.IRRTA=0重新开始
  }
}
```





第6章 制作接近于人的双足步行机器人

在前5章中，制作了可以进行微机控制的双足步行机器人，但是与人的行走相比还远远不够。人类在数百万年前开始步行以来，就在高低不平的道路上奔跑，在泥泞的道路上行走了。如何才能制作出更接近于人的机器人呢？虽说日本双足步行机器人的开发位于世界的前端，但还远远不及人的行走。为了能实现像人那样的行走，进行了各种各样的探讨。

6.1 联杆结构的界限

本书中的双足步行机器人，为了降低制作成本以及容易控制，用联杆结构实现了步行动作，如图6.1所示。

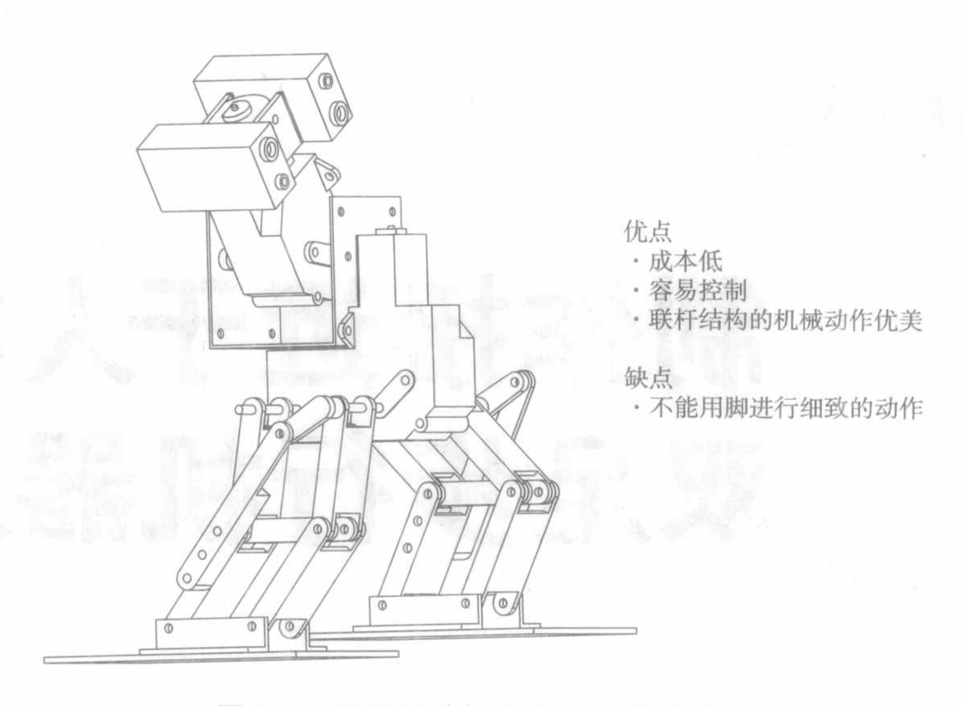


图6.1 用联杆结构实现步行的机器人

在第2章的“实验•理解”中提到过，掘土机的吊桶就是进行反复挖土、运土动作的联杆结构。联杆结构通常被用在进行反复规定动作的地方。

在本书中进行双足步行动作的联杆结构，优点是可以进行完整的步行动作，缺点是不能控制细小的步行动作。因此，只用联杆结构构成的双足步行机器人是有局限性的。

如果想让机器人在不平的道路上行走或者爬坡、上楼梯，通常的步行动作中就要增加使腿倾斜及能调整抬脚的角度、弯腰、向前伸手等很多动作，这些只用联杆结构是不能实现的。

那么，到底有何方法可以不完全依靠联杆结构呢？

目前正在研究开发的双足步行机器人中，考虑了各种各样的方法来实现双足步行，但每种方法都使用了很多电机，从而使各个关节活动自如的。也就是说，不光是联杆结构本身的问题，还要对脚、腰、膝、手、颈的动作进行控制。

6.2 增加能自由活动的关节

6.2.1 关节数和电机的配置方法

如果在足部、膝、腰上设置电机，就可以使各个关节自由活动了。

图6.2是双足步行机器人腿部电机配置的例子，脚部配有2个电机，膝上1个，腰上3个。这样，在一只腿上共使用了6个电机，双腿就要使用12个。

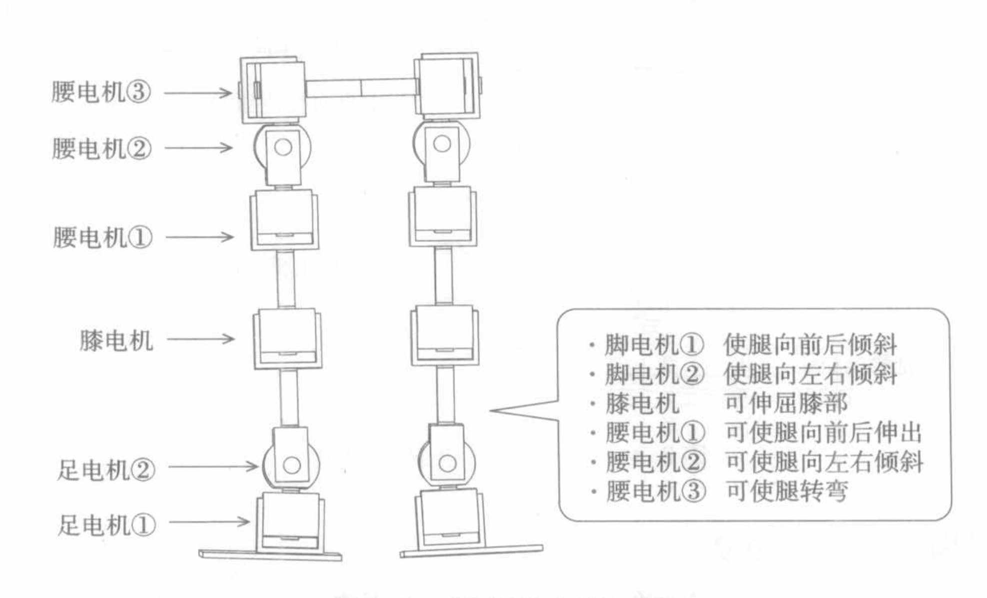


图6.2 腿部的电机配置

如果使机器人的左腿膝部弯曲且上抬的话，则变成图6.3的样子。

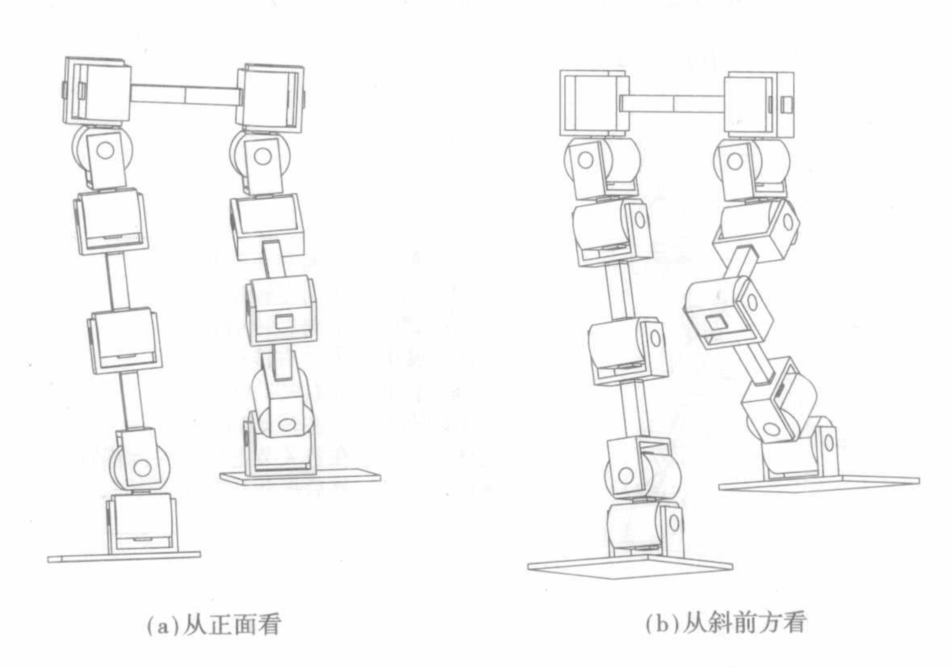


图6.3 左腿上抬时各关节处电机的样子

6.2.2 各关节的动作方法

要使各个关节按照各自的目的动作，有以下3种方法。

1.由电机的转动角度控制姿势

先确定各电机的转动角度，再按照角度转动电机，以决定整体的姿势。

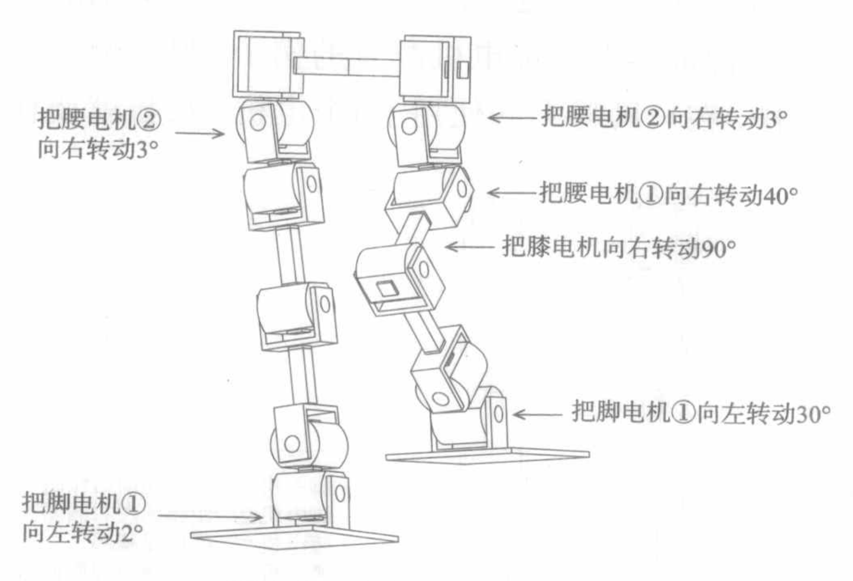


图6.4 确定各电机转动角度

2.由“指点”控制姿势

操作人直接用手摆好各关节的位置，再用传感器检测出各电机的转动角度，以决定整体的姿势。

介绍一个简单的例子，先使双足步行机器人处于“指点”调试，再用手移动各关节，成为图6.5的样子。

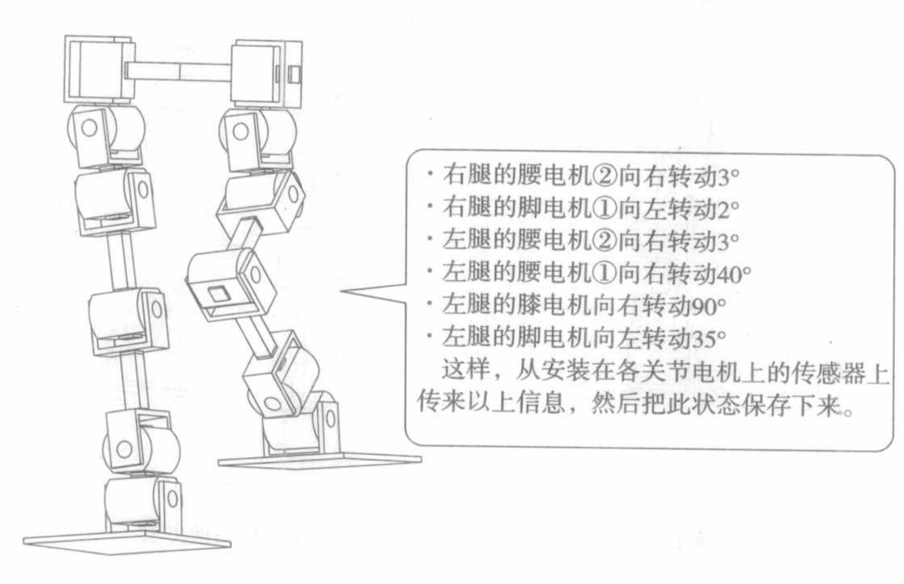


图6.5 由“指点”调试进行的姿势控制

3.由逆运动学进行姿势控制

确定某部位的位置后，再计算该部位达到此位置时其他电机需要转动的角度，以决定整体的姿势。这种方法称为逆运动学。使用这种方法，要具有大学水平相关的知识。

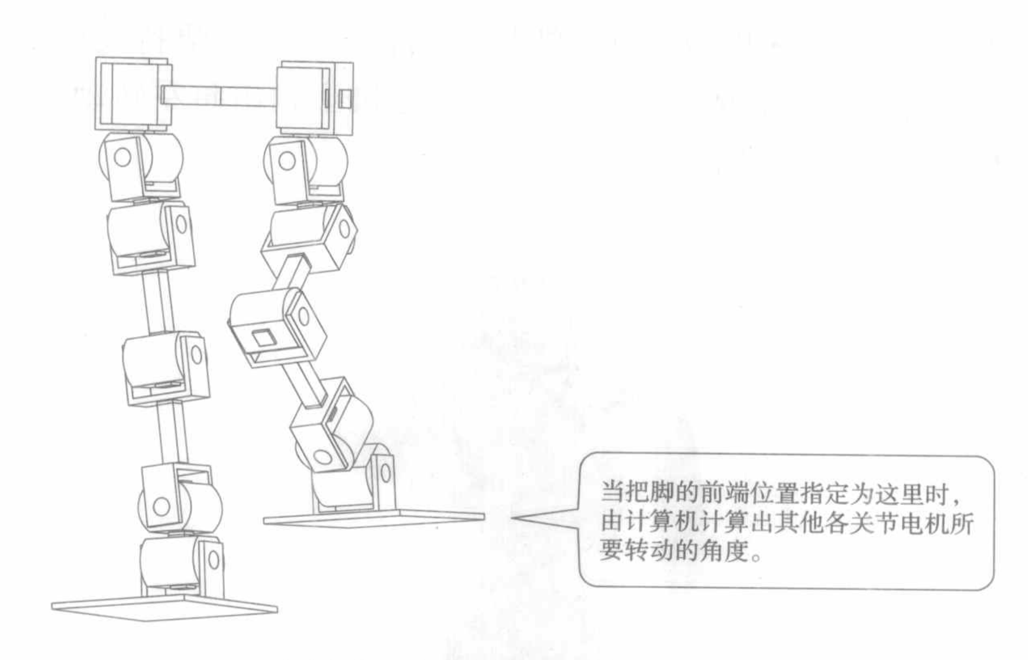


图6.6 由逆运动学进行姿势控制

无论何种方法，就双腿来说，必须要决定12个电机的位置。在实际的步行中，还必须与上身的动作保持平衡，这样就必须要控制将近20个电机。

使用动作编辑程序软件，可以从计算机的画面上指定各关节电机的转动角度。也可以用此软件组编程序，由程序确定各个电机的转动角度，以实现双足步行机器人的步行动作。

对于更高难度的控制，不光要使电机转动到指定位置，还要根据传感器数值大小来调节电机的转动角度，有时还要根据所需要的腿部位置来计算出电机的转动角度等，以此来控制双足步行机器人。

6.3 用陀螺仪传感器控制姿势

双足步行机器人在行走时，即使很小的物体也可以把它绊倒，因为这个物体具有使它的身体转动的作用。

当这个具有转动作用的力很大时，就必须要使机器人伸出腿或手了。但是当此力较小时，如果能有陀螺仪传感器检测，再控制它向反方向转动的

话，就可避免机器人倒下。陀螺仪传感器是测量角速度的传感器，角速度也就是转动速度。转动速度为0时，机器人不会倒下；如转动速度不是0，说明有转动的力作用。根据这个力的大小使电机向相反方向转动，就可以避免机器人跌倒了。

以第2章的“实验·理解”中的纸板人为例，如果在塑料夹的位置处设置电机的话，当快要向右倒下（转动）时，从电机上输出向左转动的力，就可以防止纸板人倒下了。如图6.7所示。

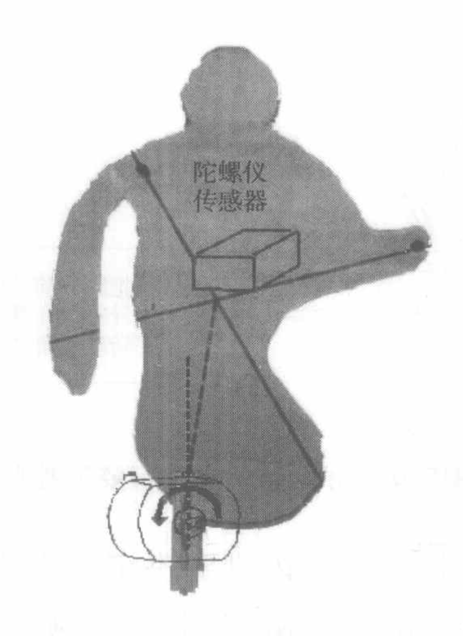


图6.7 用陀螺仪传感器控制倾斜

现以无线电控制用的陀螺仪传感器GWS（中国台湾制）的GW/PG03为例加以说明（秋目电子通商贩卖，3400日元）。

此陀螺仪传感器是连接在无线电控制的伺服电机上使用的。本来从输入端子输入的信号由R/C接收机输出后用于驱动伺服电机，但用于控制机器人时，要先从微机上输入一定的伺服信号（例如，周期为20ms，脉宽为1.5ms的信号），如图6.8所示。

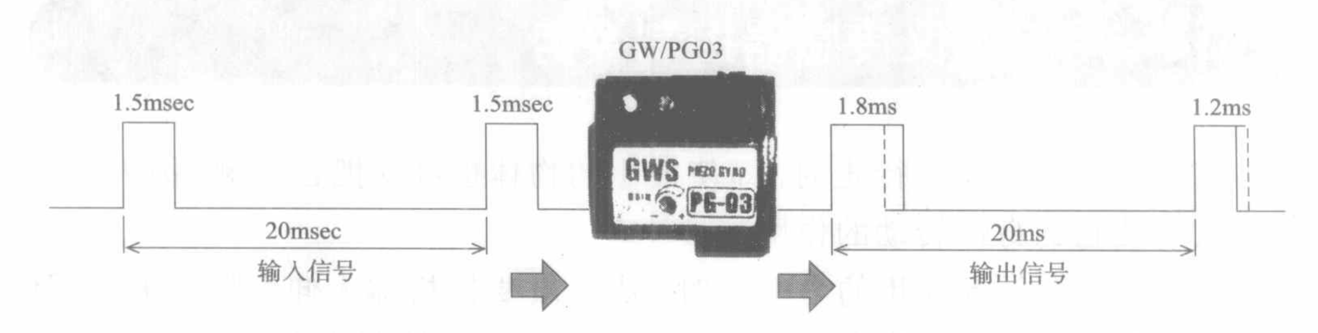


图6.8 GW/PG03的输入信号和输出信号

被输出的脉冲幅度是根据转动速度而变化的，由于这些都是由微机来读取的，因此能检测转动速度、控制姿势。

6.4　静步行和动步行

在第1章的图1.1中，对人步行的基本姿势进行了解析：

当抬起一只脚向前迈出时，另一只脚着地支撑着身体。

另外，在第2章的“实验·理解”曾经做了用塑料夹子使厚纸人形立起来的实验。通过这个实验，使我们明白了：

在厚纸人形重心的正下方，如果有支撑区（塑料夹），人形就可以立起来。

本书机器人双足步行的基本原理是

当抬起一只脚时，在机器人重心的正下方，如果着地的一只脚在支撑区内（本书的机器人为整个脚底板），双脚就在步行。

这种步行称为静步行。但很多情况下双足步行机器人的步行是动步行，即机器人重心的正下方没有着地脚（支撑区）。

图6.9是本书的双足步行机器人的示意图。为了把向前迈出的右脚抬起来，在重心的正下方必须要有着地的脚（支撑区）。因此，只有使上身倾斜、移动重心，始终在重心的正下方保持有着地脚（支撑区）的存在，才能进行步行。

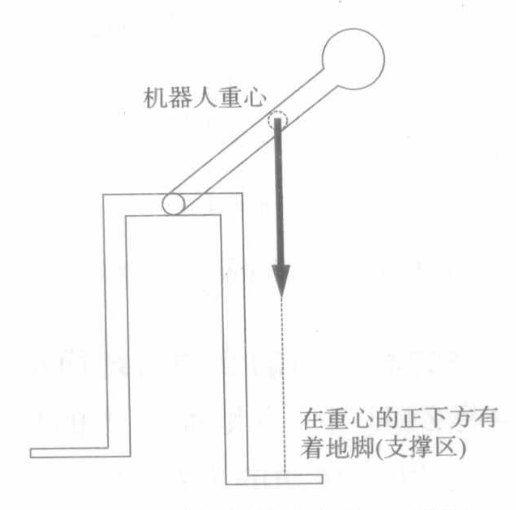
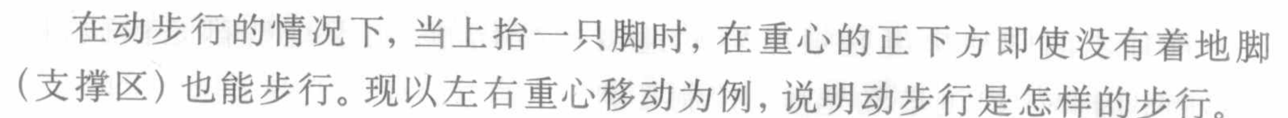


图6.9　静步行时上抬一只脚



在动步行的情况下，当上抬一只脚时，在重心的正下方即使没有着地脚（支撑区）也能步行。现以左右重心移动为例，说明动步行是怎样的步行。

1.动步行是利用了重力和惯性力的步行

动步行中巧妙地利用了作用在机器人身上的重力和惯性力，从而使机器人步行。机器人动作时要进行加速或减速，此时的作用力为惯性力，在第3章和第5章中也许会遇到这种情况。对双足步行机器人进行控制时，即使电机停止了，重心倾斜并没有马上停止，以至于使重心过度倾斜。这也是惯性力的作用。

2.重力和惯性力的合力方向与地面的交点为目标ZMP

巧妙利用重力和惯性力使重心移动的情况如图6.10所示，箭头的长度表示力的大小，箭头的方向表示力的方向。

惯性力的方向为水平方向，重力的方向向下，所以两力的合力作用在斜方向上（惯性力和重力的箭头组成的四方形的对角线上）。这个斜线和地面的交点称为目标ZMP。

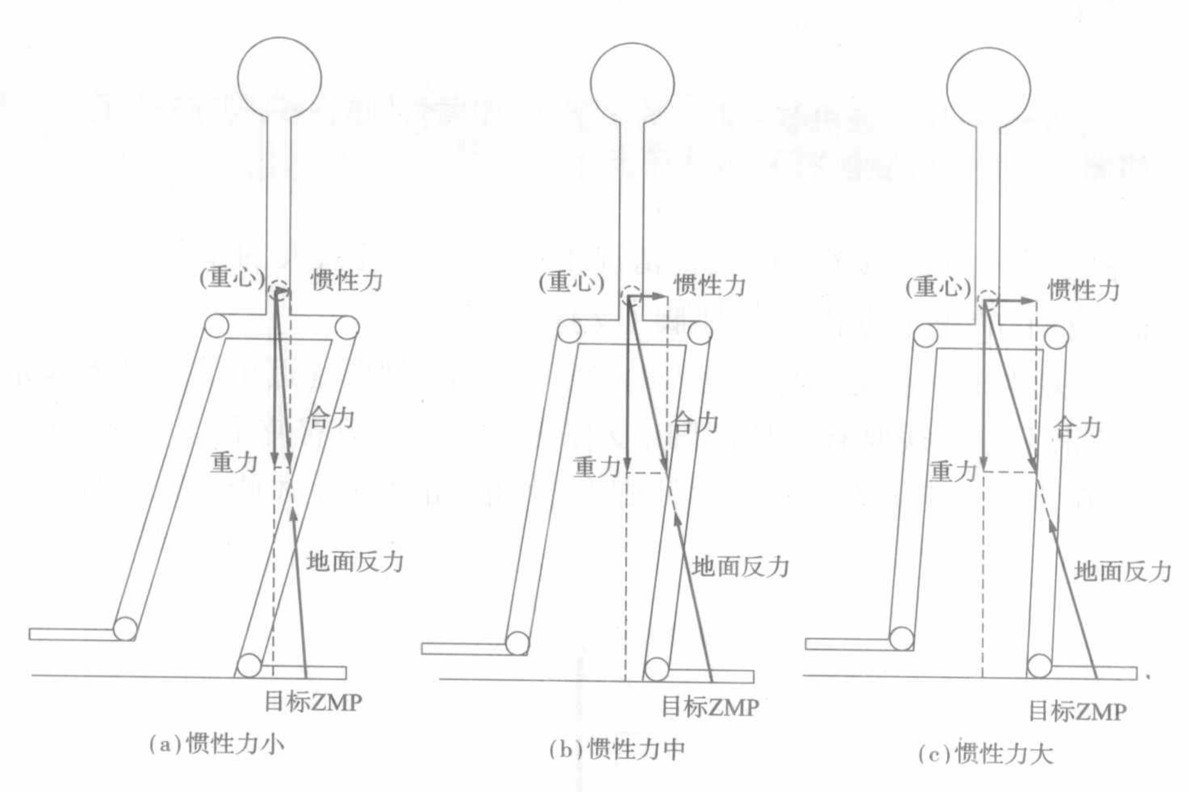
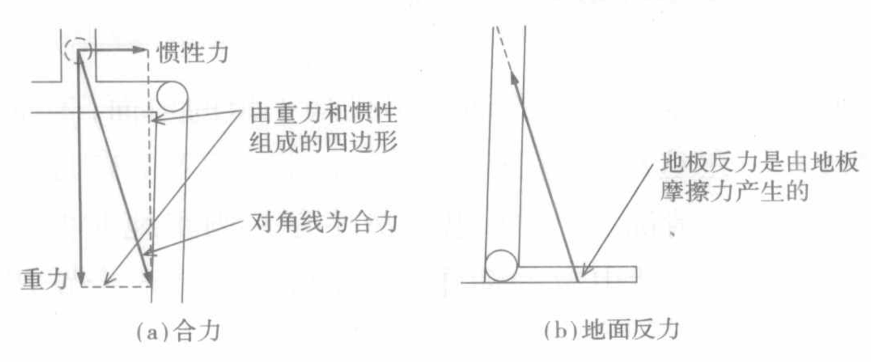


图6.10 动步行的重心移动

3.在目标ZMP内，惯性力和重力的合力与地面反力相平衡

如图6.11所示，在目标ZMP中，有地面反力的作用，地面反力与惯性力和重力的合力的方向和大小以及转动的力都相互平衡。因为平衡，所以机器

人不会倒下。



(a)合力 (b)地面反力

图6.11 合力和地面反力

地面反力是机器人不倒下行走的非常重要的力。因地面有摩擦，故行走刚开始时就产生了此力。如果地面象冰那样光滑的话，就不会产生摩擦力，机器人就要倒下。

4.目标ZMP如果有着地脚（支撑区），行走时就不会倒下

如图6.10所示，目标ZMP如果有着地脚（支撑区），双足步行机器人行走时就不会倒下。例如，在图6.10（b）和（c）中，重心正下方的点偏高于着地脚，如果是静步行的话，机器人就会倒下。此时巧妙利用了惯性力，使目标ZMP在着地脚（支撑区）内，因此机器人行走时不会倒下。

5.调整惯性力和机器人的动作，使目标ZMP在着地足（支撑区）内

由图6.10可以看出：由于调整了惯性力，目标ZMP可以始终处于着地脚（支撑区）内。

在6.10(a)中，机器人的重心在开始向左移动的时候，向右的惯性力虽然很小，但足以把目标ZMP带到着地脚（支撑区）内。

在6.10(b)中，机器人的重心向左加速移动，向右的惯性力也稍微变大了，但仍然可以把目标ZMP带到着地脚（支撑区）内。

在6.10(c)中，机器人的重心向左加速移动到最大，在重力的正下方没有着地脚（支撑区），但由于有方向向右的较大惯性力，故也可以把目标ZMP带到支撑区。

以上对双足步行机器人的左右动作进行了分析。至于前后的动作，道理也是相同的。

在静步行中，在重心的正下方，如果有着地脚（支撑区），步行就不会倒下。

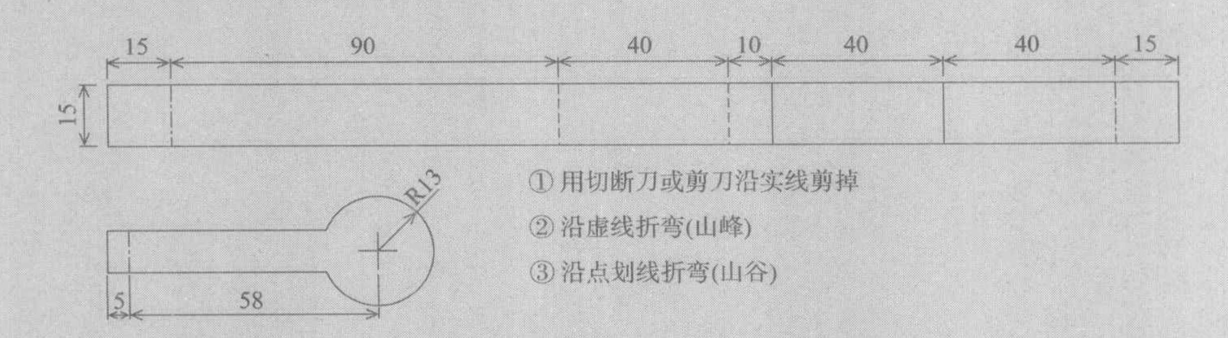
在动步行中，重心的正下方即使没有着地脚（支撑区），如果目标ZMP在着地脚（支撑区）内，步行就不会倒下。

不过，双足步行机器人步行的环境不只是平坦的地面，有时地面凸凹不平，有时是斜坡……在这样的道路上步行时，目标ZMP有时会偏离支撑区而使机器人倒下。这种情况下，如果想办法使它在脚踏地时伸开腿或者使身体倾斜，做我们在日常生活中做的动作的话，机器人就不会跌倒而持续步行了。

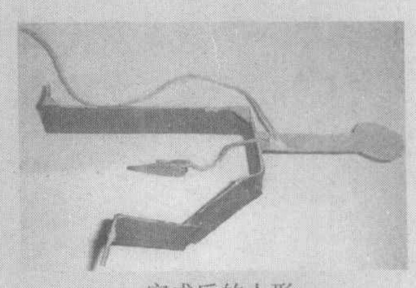
实验·理解

动步行的平衡实验

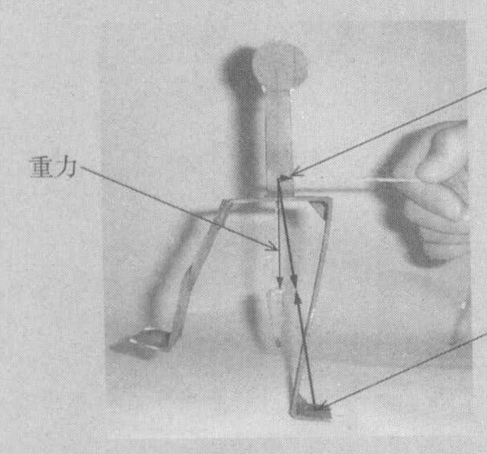
在双足步行机器人的动步行中，利用惯性力使它步行时不跌倒的原理可以用厚纸做的人形进行实验。先按下图制作厚纸人形。

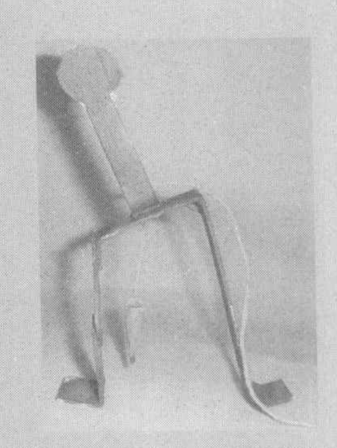


把各部件粘接好后，做成厚纸人形，再把右腿贴成使脚处于向前方上抬的状态。用胶带粘接线绳，把重力和惯性力的方向标出来。为了更清楚地表示重力的方向，在线绳的下端栓上铅笔头。


完成后的人形

水平方向拉伸绳子时，人形就在抬脚的状态下站立起来了。在第2章“实验·理解”中，这种情况下人形是倒下的。这就是动步行和静步行的不同之处。水平方向拉绳子时的拉力相当于正在进行动步行的双足步行机器人的惯性力，如果此力过大，人形就会向右过度倾斜而倒下。




如果没有拉力，右脚就会着地



如果水平方向的拉力过小，人形就会向左倾斜而使右脚不能抬起。对于实际的机器人来说，由于具有一定的重量，在这种状态下就会跌倒。

重心的正下方即使没有着地脚（支撑区），如果水平方向的拉力（相当于机器人动步行的惯性力）恰当的话，人形的一只脚也能抬起来。

科学出版社

科龙图书读者意见反馈表

书　　名 ________________________________

个人资料

姓　　名：____________ 年　　龄：__________ 联系电话：________________

专　　业：____________ 学　　历：__________ 所从事行业：______________

通信地址：________________________________ 邮　　编：__________

E-mail：________________________________

宝贵意见

◆ 您能接受的此类图书的定价

20 元以内□　30 元以内□　50 元以内□　100 元以内□　均可接受□

◆ 您购本书的主要原因有(可多选)

学习参考□　教材□　业务需要□　其他 ______________

◆ 您认为本书需要改进的地方(或者您未来的需要)

____

____

◆ 您读过的好书(或者对您有帮助的图书)

____

____

◆ 您希望看到哪些方面的新图书

____

____

◆ 您对我社的其他建议

____

____

谢谢您关注本书！您的建议和意见将成为我们进一步提高工作的重要参考。我社承诺对读者信息予以保密，仅用于图书质量改进和向读者快递新书信息工作。对于已经购买我社图书并回执本“科龙图书读者意见反馈表”的读者，我们将为您建立服务档案，并定期给您发送我社的出版资讯或目录；同时将定期抽取幸运读者，赠送我社出版的新书。如果您发现本书的内容有个别错误或纰漏，烦请另附勘误表。

回执地址：北京市朝阳区华严北里 11 号楼 3 层

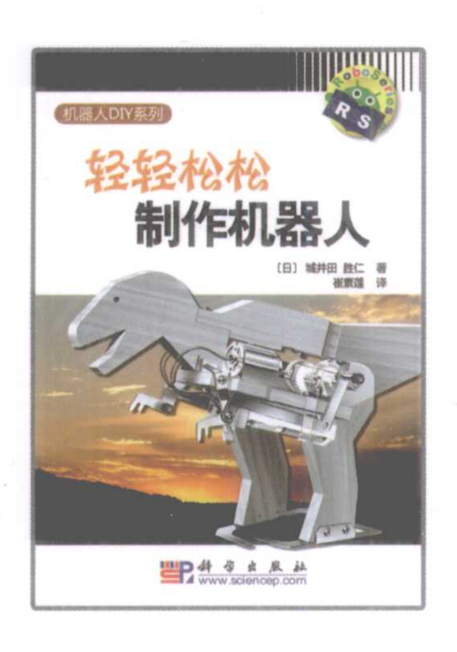
科学出版社东方科龙图文有限公司电工电子编辑部(收)

邮编：100029

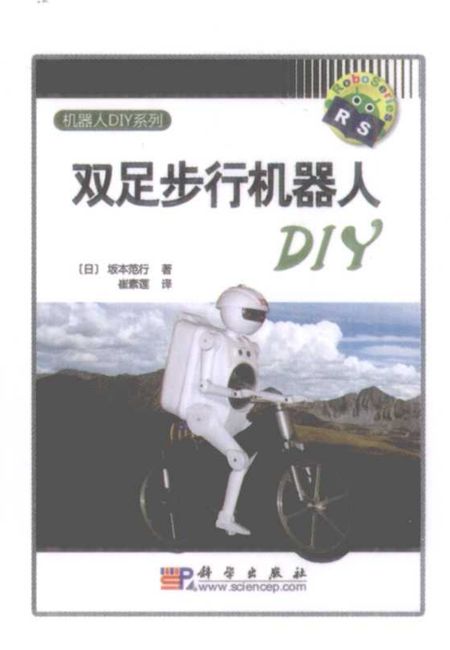




(TP—4922.0101)
责任编辑　喻永光　杨　凯
责任制作　董立颖　魏　谨
封面设计　郝恩誉







建议上架类别：工业技术/电子技术

科学出版社 东方科龙

http://www.okbook.com.cn
boktp@mail.sciencep.com

ISBN 978-7-03-028774-8



定　价：28.00 元